



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**VYTVOŘENÍ 3D MODELU ZA POMOCI  
LASEROVÉHO VZORU**

3D MODEL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Martin Krátký

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Martin Krátký

**Ročník:** 3

**ID:** 195672

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vytvoření 3D modelu za pomoci laserového vzoru

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte pracoviště pro vytvoření celkového prostorového modelu objektu (bez podstavy) na základě jeho nasvícení laserovým vzorem

- 1) Nastudujte metody prostorové rekonstrukce objektu za pomoci kamery a laserového vzoru.
- 2) Definujte požadavky na měřicí systém v závislosti na vlastnostech objektu a realizujte měřicí pracoviště.
- 3) Nasnímejte sady snímků pro testování metod rekonstrukce.
- 4) Realizujte metody rekonstrukce a zhodnoťte kvalitu výsledných modelů nasnímaných objektů.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Žára J., Beneš B., Sochor J., Felkel P.: Moderní počítačová grafika, Computer Press, 2005, ISBN 978-80-21-0454-5

Sonka M., Hlavac V., Boyle R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 3rd Edition, CL Engineering, 2007, ISBN: 978-0495082521

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 20.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík,  
CSc.**

*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

*Cílem bakalářské práce je vytvoření prostorového modelu ze snímků zachycujících objekt nasvícený laserovým vzorem. V práci jsou uvedena možná řešení problému pomocí metod aktivní triangulace a stereoskopie. Metody jsou navrženy pro laboratorní a venkovní měření. Jsou definovány požadavky, které by mělo splňovat měřicí pracoviště a následně je prezentováno realizované pracoviště. Každá z navržených metod je otestována snímáním řady objektů.*

## **Klíčová slova**

*Zpracování obrazu, počítačové vidění, rekonstrukce, aktivní triangulace, stereoskopie*

## **Abstract**

*The aim of this bachelor thesis is to create a spatial model from images capturing an object illuminated by a laser pattern. The thesis presents possible solutions to the problem using methods of active triangulation and stereoscopy. Methods are designed for laboratory and outdoor measurements. The requirements for the measuring workplace are defined and then the implemented workplace is presented. Each of the designed methods is tested by scanning a series of objects.*

## **Keywords**

*Image processing, computer vision, reconstruction, active triangulation, stereoscopy*

## **Bibliografická citace:**

*KRÁTKÝ, Martin. Vytvoření 3D modelu za pomoci laserového vzoru. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119313>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Miloslav Richter.*

## Prohlášení

*„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vytvoření 3D modelu za pomoci laserového vzoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

V Brně dne: **20. května 2019**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miloslavu Richterovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při zpracování mé bakalářské práce.*

V Brně dne: **20. května 2019**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod .....	11
2	Geometrická prerekvizita .....	12
2.1	Souřadné systémy .....	12
2.1.1	Válcový souřadný systém.....	12
2.1.2	Homogenní souřadný systém .....	13
2.1.3	Souřadný systém kamery .....	13
2.2	Model kamery .....	14
2.2.1	Vnitřní parametry .....	15
2.2.2	Vnější parametry .....	15
2.2.3	Kalibrace kamery .....	16
2.3	Epipolární geometrie.....	17
2.3.1	Rektifikace snímků.....	18
2.3.2	Fundamentální matice .....	19
2.3.3	Esenciální matice.....	20
3	Metody prostorové rekonstrukce .....	21
3.1	Aktivní triangulace.....	21
3.1.1	Filtrace okolí laseru.....	23
3.1.2	Výpočet bodů v prostoru .....	23
3.1.3	Výhody a nevýhody .....	24
3.2	Stereoskopie .....	24
3.2.1	Určení pozice kamer.....	25
3.2.2	Hledání korespondujících bodů.....	25
3.2.3	Rekonstrukce korespondujících bodů .....	26
3.2.4	Výhody a nevýhody .....	27
3.3	Reprezentace 3D modelů .....	28
3.3.1	Křivky.....	28
3.3.1.1	Polynomiální křivky .....	29
3.3.2	Povrchy.....	29
3.3.2.1	Bodová reprezentace .....	29
3.3.2.2	Trojúhelníková reprezentace .....	30
3.3.2.3	Čtyřúhelníková reprezentace .....	30

3.3.3	Textury .....	31
3.3.4	Formáty .....	31
4	Měřicí pracoviště .....	32
4.1	Požadavky .....	32
4.1.1	Rozměr objektu .....	32
4.1.2	Materiál objektu .....	32
4.2	Uspořádání optického systému .....	33
4.2.1	Rozměr báze .....	33
4.2.2	Vzdálenost objektu od optického systému .....	34
4.3	Volba optického systému .....	34
4.3.1	Laboratorní měření .....	34
4.3.2	Venkovní měření .....	35
5	Realizace metod.....	37
5.1	Aktivní triangulace.....	38
5.2	Stereoskopie s otáčejícím se objektem .....	38
5.3	Stereoskopie s objektem na pevno .....	38
5.4	Korekční algoritmy .....	39
5.4.1	Korekce přesahů .....	40
5.4.1.1	Korekce pomocí minimálních a maximálních hodnot .....	40
5.4.1.2	Korekce průměrováním .....	41
5.4.2	Korekce polohy osy rotace .....	41
6	Testování metod .....	42
6.1	Testování metod snímajících otáčející se objekt .....	42
6.1.1	Rekonstrukce vázy .....	42
6.1.1.1	Rekonstrukce vázy pomocí aktivní triangulace.....	43
6.1.1.2	Rekonstrukce vázy pomocí stereoskopie .....	45
6.1.2	Rekonstrukce figurky .....	47
6.1.2.1	Rekonstrukce figurky pomocí aktivní triangulace .....	48
6.1.2.2	Rekonstrukce figurky pomocí stereoskopie .....	50
6.2	Testování metody stereoskopie snímající nehybný objekt .....	51
6.2.1	Zhodnocení dílčích pohledů .....	52
6.2.2	Výsledný model.....	54
7	Závěr.....	56



# Seznam obrázků

Obr. 2.1 Válcový souřadný systém (vychází z [1]) .....	13
Obr. 2.2 Model kamery (vychází z [4]) .....	14
Obr. 2.3 Detekované body na kalibrační mřížce.....	17
Obr. 2.4 Epipolární geometrie (vychází z [4]).....	18
Obr. 2.5 Rektifikovaný tvar (vychází z [3]).....	19
Obr. 3.1 a) Rozložení kdy kamera a laser krouží kolem snímaného objektu b) rozložení kdy se otáčí snímaný objekt c) rozložení, kdy je kamera a laser nad objektem a mění se sklon laseru .....	22
Obr. 3.2 Princip aktivní triangulace .....	24
Obr. 3.3 Korespondující body rektifikovaných snímků .....	26
Obr. 3.4 Reprezentace povrchů a) bodová b) trojúhelníková c) čtyřúhelníková .....	29
Obr. 3.5 Delaunayova triangulace [20] .....	30
Obr. 4.1 Vliv rozměru báze na množství detekovaných bodů a) dlouhá báze b) krátká báze .....	33
Obr. 4.2 Laboratorní měřicí pracoviště a) při rekonstrukci pomocí aktivní triangulace b) při rekonstrukci pomocí stereoskopie .....	35
Obr. 4.3 Venkovní měřicí pracoviště .....	36
Obr. 5.1 Přesahy vzniklé při rekonstrukci .....	40
Obr. 5.2 Korekce přesahů a) pomocí minimálních a maximálních hodnot b) průměrováním. ....	40
Obr. 5.3 a) Chybně určená osa rotace b) korekce osy rotace.....	41
Obr. 6.1 Váza .....	43
Obr. 6.2 Rekonstrukce vázy pomocí aktivní triangulace a) získané body b) křivky c) pohled na model vázy zepředu.....	43
Obr. 6.3 Pohled shora na model vázy získaný metodou aktivní triangulace a) bez korekce osy rotace b) s korekcí osy rotace .....	44
Obr. 6.4 Model vázy získaný metodou aktivní triangulace .....	45
Obr. 6.5 Rekonstrukce vázy pomocí stereoskopie a) získané body b) křivky c) pohled na model vázy zepředu.....	45

Obr. 6.6 Pohled shora na model vázy získaný metodou stereoskopie a) bez korekce osy rotace b) s korekcí osy rotace .....	46
Obr. 6.7 Model vázy získaný metodou stereoskopie .....	47
Obr. 6.8 Figurka.....	48
Obr. 6.9 Pohled na model figurky získaný metodou aktivní triangulace a) zepředu b) zezadu c) zprava.....	49
Obr. 6.10 Model figurky získaný metodou aktivní triangulace .....	49
Obr. 6.11 Pohled na model figurky získaný pomocí stereoskopie a) zepředu b) zezadu c) zprava.....	50
Obr. 6.12 Model figurky získaný metodou stereoskopie.....	51
Obr. 6.13 Kovadlina.....	51
Obr. 6.14 a) Pohled na kovadlinu zepředu b) zrekonstruované body .....	52
Obr. 6.15 a) Pohled na kovadlinu zprava b) zrekonstruované body pohledu na kovadlinu zprava.....	53
Obr. 6.16 a) Pohled na kovadlinu zezadu b) zrekonstruované body .....	53
Obr. 6.17 a) Pohled na kovadlinu zleva b) zrekonstruované body .....	54
Obr. 6.18 Pohled na model kovadliny, ze kterého je viditelná přední a pravá část..	55
Obr. 6.19 Pohled na model kovadliny, ze kterého je viditelná zadní a levá část.....	55

# 1 ÚVOD

Vytvoření prostorového modelu je problematikou řešenou v oborech počítačového vidění a zpracování obrazu. Cílem práce je vytvoření prostorového modelu na základě nasvícení objektu laserovým vzorem a následným zaznamenáním pomocí kamer. Metody prostorové rekonstrukce se dělí na aktivní a pasivní. Princip aktivních metod využívá nasvícení snímaného objektu známým vzorem, proto budou uvažovány zejména aktivní, případně modifikované pasivní metody. Aby bylo možné aplikovat metody prostorové rekonstrukce je třeba nasnímat sadu snímků. K pořizování snímků slouží měřicí pracoviště, na které jsou kladeny různé nároky v závislosti na použité metodě a vlastnostech objektu. Aplikované metody se neliší pouze principem, ale i způsobem jakým byly pořízeny snímky. Bude se rozlišovat případ kdy se objekt otáčí a případ, kdy se objekt nehýbe a je nutné měnit pozici měřicího systému. Při pořízení dostatečného množství snímků lze aplikovat metody prostorové rekonstrukce, a tím získat body v prostoru reprezentující snímáný objekt. Po vhodné úpravě a spojení bodů hranami, vznikne síť mnohoúhelníků definující model objektu.

Teoretická část práce je rozdělena do dvou kapitol. První z nich je věnována pravidlům geometrie, která jsou uplatňována při prostorové rekonstrukci. V této kapitole je popsána řada používaných souřadných systémů, dále je vysvětlen model kamery a vztah pořízených snímků s trojrozměrným světem který zachycují. V závěru kapitoly je popsána epipolární geometrie definující vztah dvojice kamer snímajících stejnou scénu. Následující kapitola je věnována metodám prostorové rekonstrukce. První z metod je metoda aktivní triangulace, která pro rekonstrukci objektu využívá kamery a laseru. Další metodou je stereoskopie, jejíž měřicí systém je složen z dvojice kamer. Metoda je modifikována přiřazením laseru. Výsledkem metod prostorové rekonstrukce je množina bodů v prostoru. V závěru kapitoly je popsáno, jak z těchto bodů vzniká plocha definující výsledný prostorový model.

Praktická část obsahuje tři kapitoly. První z nich je věnována měřicímu pracovišti, které má za úkol snímání sady snímků měřeného objektu. V kapitole jsou uvedeny požadavky na měřicí pracoviště, je popsán vliv rozložení optického systému na kvalitu výsledných modelů a jsou uvedeny možné konfigurace, ať už se jedná o laboratorní, nebo venkovní měření. Následující kapitola popisuje realizaci metod. Jsou v ní prezentovány navržené algoritmy pro rekonstrukci otáčejícího se objektu pomocí aktivní triangulace a stereoskopie. Dále je popsán návrh rekonstrukce neotáčejícího se objektu pomocí stereoskopie a jsou uvedeny navržené korekční algoritmy. Poslední kapitola praktické části slouží k otestování navržených metod rekonstrukcí objektů.

## 2 GEOMETRICKÁ PREREKVIKITA

Tato kapitola slouží ke shrnutí pojmů a pravidel z geometrie, které jsou dále aplikovány v metodách prostorové rekonstrukce. V kapitole budou vysvětleny používané souřadné systémy a bude popsán model kamery, který definuje vztah snímku pořízeného kamerou s okolím, které zaznamenal. Závěr kapitoly je zaměřen na epipolární geometrii, která popisuje geometrii tvořenou dvěma pohledy kamer zaznamenávajícími stejnou scénu.

### 2.1 Souřadné systémy

Při prostorové rekonstrukci bude využíváno řady souřadných systémů. Tato kapitola slouží k popisu každého z nich a jejich vzájemné transformace. Aplikace válcového souřadného systému bude uplatněna při prostorové rekonstrukci otáčejícího se objektu. Souřadný systém kamery bude použit při zachycování reálného světa pomocí kamery a homogenní souřadný systém při rekonstrukci pomocí stereoskopie.

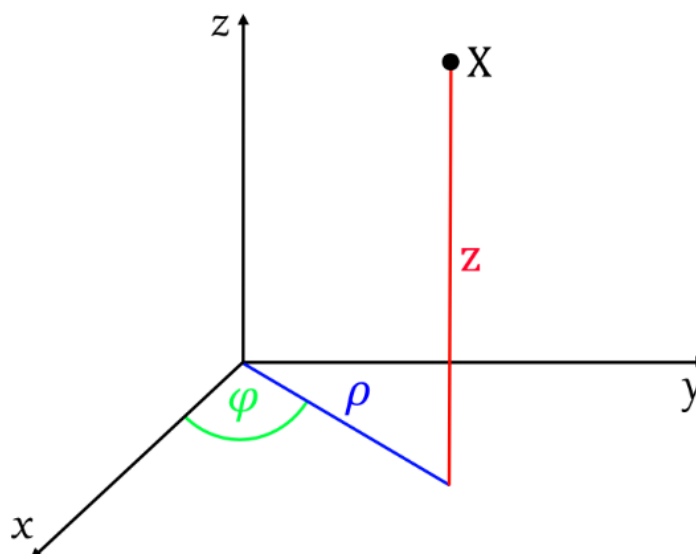
#### 2.1.1 Válcový souřadný systém

Válcový (cylindrický) souřadný systém je definován pomocí polárních souřadnic  $\rho$ ,  $\varphi$  a prostorové souřadnice  $z$ . Souřadnice  $\rho$  udává vzdálenost bodu od počátku souřadného systému. Úhel  $\varphi$  je definován natočením kolem osy  $z$ . Souřadnice  $z$  odpovídá souřadnici  $z$  vyjádřené pomocí kartézského souřadného systému. Transformace do válcového souřadného systému má pak následující tvar:

$$\begin{aligned}x &= \rho \cos \varphi \\y &= \rho \sin \varphi \\z &= z\end{aligned}\tag{2.1}$$

kde  $\rho \geq 0$ ,  $\varphi \in \langle 0; 2\pi \rangle$  a  $z \in \mathbb{R}$  [1].

Uplatnění válcového souřadného systému je vhodné v případě, kdy se snímá otáčející se objekt. Každé natočení objektu je pak definováno úhlem  $\varphi$ . Obr. 2.1 vyjadřuje zobrazení bodu  $X$  ve válcovém souřadném systému.



Obr. 2.1 Válcový souřadný systém (vychází z [1])

### 2.1.2 Homogenní souřadný systém

Homogenní souřadný systém reprezentuje bod v prostoru pomocí čtyř souřadnic, má tak o souřadnici více než kartézský souřadný systém. Bod v prostoru  $X$  vyjádřený pomocí homogenních souřadnic má následující tvar:

$$X = [x_H, y_H, z_H, t]' \quad (2.3)$$

kde  $(x_H, y_H, z_H)$  jsou homogenní souřadnice a parametr  $t$  se nazývá váha bodu [2]. Vztah mezi kartézským a homogenním souřadným systémem je následující:

$$x = \frac{x_H}{t}, y = \frac{y_H}{t}, z = \frac{z_H}{t}, t \neq 0 \quad (2.4)$$

kde  $(x, y, z)$  jsou kartézské souřadnice definující bod v prostoru  $X$ .

Uplatnění homogenního souřadného systému je vhodné zejména při použití transformačních matic. Může se jednat například o aplikaci rotační matice, nebo translačního vektoru na souřadnice bodů na snímku. Zmíněné transformační matice budou vysvětleny v kapitole 2.2.2 zabývající se vnějšími parametry kamery.

### 2.1.3 Souřadný systém kamery

Souřadný systém kamery je uplatňován při zpracování snímků zachycujících rekonstruovaný objekt. Snímek pořízený pomocí kamery je dvourozměrný, proto je ho

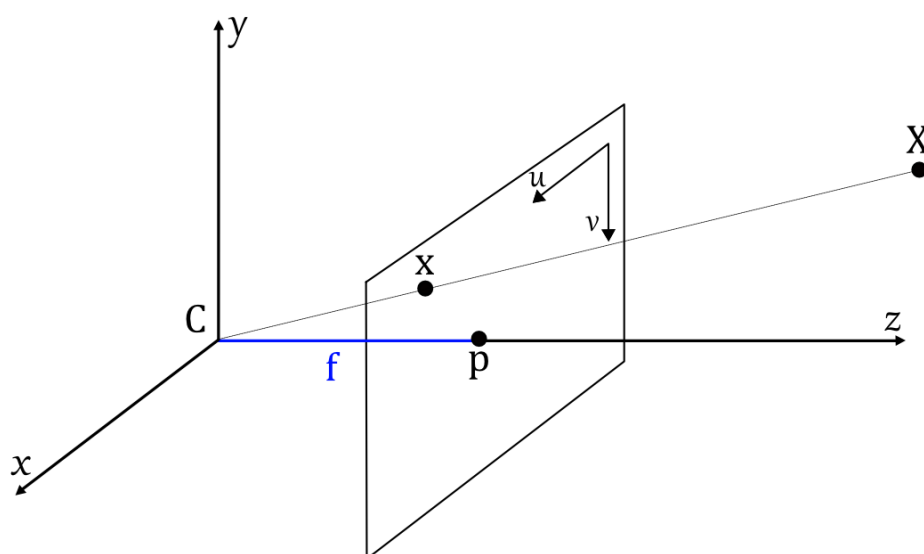
možné brát jako matici, která má rozměr definovaný rozlišením snímku. Prvky této matice jsou pixely, sloupce v matici jsou označovány jako  $u$  a řádky jako  $v$  (Obr. 2.2). Vztah souřadnic snímku  $(u, v)$  a kartézských souřadnic  $(x, y, z)$  je následující:

$$u = \frac{xf}{z}, \quad v = \frac{yf}{z} \quad (2.2)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost, která definuje vzdálenost centra kamery od obrazové roviny [3]. Zmíněné pojmy budou blíže popsány v následující kapitole, zabývající se modelem kamery.

## 2.2 Model kamery

Souhrn vlastností kamery je definován pomocí vnitřních a vnějších parametrů. Vnitřní parametry kamery vyjadřují vztah dvourozměrného souřadného systému kamery a trojrozměrného světa zaznamenaného kamerou. Vnější parametry kamery definují pozici a orientaci souřadného systému kamery v prostoru. K určení vnitřních a vnějších parametrů slouží kalibrace kamery.



Obr. 2.2 Model kamery (vychází z [4])

Základní a nejčastěji používaný způsob pro definici vlastností kamery při prostorové rekonstrukci je pomocí modelu dírkové kamery. Model je popsán pomocí optického centra kamery  $C$  a obrazové roviny. Jejich vzájemnou vzdálenost vyjadřuje ohnisková vzdálenost  $f$ . Přímka, která je kolmá k obrazové rovině a prochází centrem kamery  $C$  se nazývá optická osa kamery. Její průsečík s obrazovou rovinou se nazývá střed snímku  $p$ . Bod v prostoru  $X$  je promítnut do obrazové roviny kamery přímkou

procházející bodem  $x$  na snímku kamery a centrem kamery  $C$  [5]. Kartézskému souřadnému systému, který vyjadřuje bod v prostoru se říká souřadný systém kamery a jeho počátek je v centru kamery [6].

### 2.2.1 Vnitřní parametry

Vnitřní parametry kamery lze vyjádřit pomocí kalibrační matice kamery  $K$ , kterou je možné získat procesem zvaným kalibrace kamery. Matice kamery  $K$  popisuje převod ze souřadného systému centra kamery do souřadného systému snímku [5]. Jedná se tak o převod z metrických souřadnic na souřadnice v pixelech. Matice kamery  $K$  má následující tvar:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{f}{k} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{l} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost. Souřadnice  $(u, v)$  snímku kamery jsou vyjádřeny v pixelech, které nemusí mít čtvercový tvar, proto jsou zavedeny dva měřítkové parametry  $k$  a  $l$ , které udávají rozměr pixelů v milimetrech [7]. Poměr  $f/k$  a  $f/l$  slouží pro převod souřadnic  $(x, y, z)$  které jsou vyjádřeny v milimetrech, na souřadnice  $u, v$ , které jsou v pixelech [8]. Souřadnice  $(u_0, v_0)$  udávají pozici středu souřadného systému snímku  $p$ . Dá se předpokládat, že pixely na snímcích zachycených kamerami mají pixely ve tvaru čtverce. Vztah mezi souřadnicemi  $(x, y, z)$  a  $(u, v)$  v homogenním souřadném systému včetně zjednodušení při uvažování čtvercových pixelů je pak následující [5] [8]:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Vnější parametry

Vnější parametry kamery udávají pozici centra kamery v prostoru. Pokud je v měřicím systému více kamer, k čemuž dochází při rekonstrukci pomocí stereoskopie, je nutné vypočítat jejich vzájemnou pozici. Změna pozice souřadného systému kamery  $C$  může být vyjádřena pomocí posuvu (translace) a změna orientace pomocí otáčení (rotace). Translační vektor  $T$  udává posun centra kamery  $C$  a je vyjádřen následujícím vztahem:

$$T = C_1 - C_2 = [T_x \ T_y \ T_z]' \quad (2.3)$$

kde  $C_1$  je původní pozice souřadného systému kamery a  $C_2$  je pozice na kterou se přesunul.  $T_x$  značí posun po ose  $x$ ,  $T_y$  po ose  $y$  a  $T_z$  po ose  $z$  [9]. Rotační matice  $R$  udává změnu natočení souřadného systému kamery  $C$  kolem tří os souřadného systému ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) a má následující tvar:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

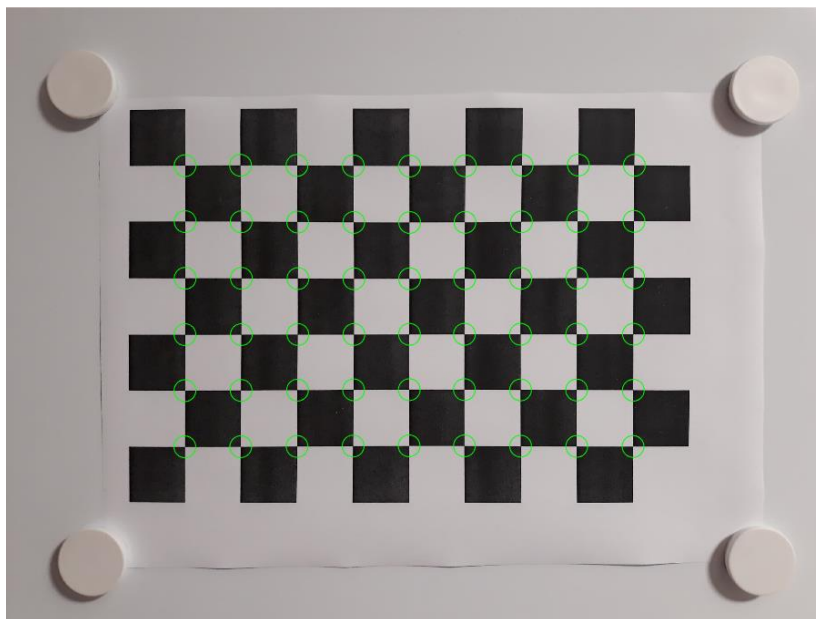
Parametry  $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  udávají rotaci kolem osy  $x$ ,  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$  kolem osy  $y$  a  $R_{31}$ ,  $R_{32}$ ,  $R_{33}$  kolem osy  $z$  [10]. Kombinací vnitřních a vnějších parametrů se získá matice kamery, která má následující tvar: [4]

$$P = K[R \mid T] \quad (2.5)$$

### 2.2.3 Kalibrace kamery

Cílem kalibrace kamery je zjištění vnitřních, případně vnějších parametrů kamery. Standardní metodou kalibrace kamery je pomocí vzorů se známým rozměrem a pozicí v souřadném systému [9]. Nejčastěji je používána kalibrační mřížka připomínající šachovnici. Čtverce mají shodný a předem známý rozměr. Následně se detekují vrcholy čtverců, podle kterých se určí vnitřní, případně vnější parametry kamery (Obr. 2.3).



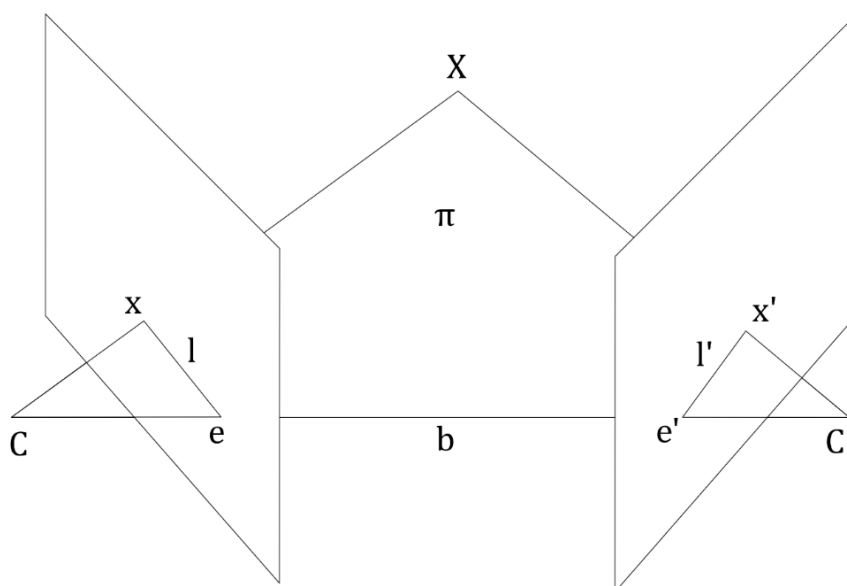


Obr. 2.3 Detekované body na kalibrační mřížce

## 2.3 Epipolární geometrie

Epipolární geometrie dvou pohledů je plocha, která protíná zorná pole kamer. Její využití je zejména při rekonstrukci pomocí stereoskopie. Důležitou roli při aplikaci této metody hrají korespondující body, které jsou zaznamenány dvojicí pohledů. Korespondující body se jím říká, protože zobrazují tentýž bod v prostoru. Samotná epipolární geometrie může být algebraicky vyjádřena pomocí fundamentální, nebo esenciální matice, které jsou popsány v kapitolách 2.3.2 a 2.3.3. Zmíněné matice se používají v případě, kdy nejsou kalibrované pohledy kamer k získání matice kamery  $P$ .

Geometrická podstata epipolární geometrie bude popsána pomocí dvojice korespondujících bodů  $x$  a  $x'$  reprezentujících bod v prostoru  $X$  zaznamenaný dvojicí kamer. Princip je graficky znázorněn na Obr. 2.4. Body  $x$  a  $x'$ , centra kamer  $C$  a  $C'$  a bod v prostoru  $X$  jsou navzájem koplanární, což znamená že leží v jedné rovině zvané  $\pi$ . Přímký procházející body  $x$ ,  $C$  a  $x'$ ,  $C'$  představují paprsky, které se protnou v bodě  $X$  a leží v rovině  $\pi$ . Tyto paprsky jsou mimo jiné zobrazeny pohledem druhé kamery jako epipolární přímky  $l'$  (případně  $l$ ). Orientací epipolárních přímek se zabývá rektifikace snímků, které je věnována kapitola 2.3.1. Na obrázku jsou znázorněny další parametry definující vzájemný vztah mezi snímky kamer. Báze  $b$  je vzdálenost center kamer  $C$  a  $C'$ , velikost báze určuje maximální hloubku, kterou je možné zaznamenat. Průsečíkem epipolární přímky  $l$  a báze  $b$  je epipola  $e$  [4].



Obr. 2.4 Epipolární geometrie (vychází z [4])

### 2.3.1 Rektifikace snímků

Cílem rektifikace snímků je transformovat snímky obou pohledů tak, aby měly horizontální epipolární přímky  $l$ . Tato operace značně zjednoduší zásadní problém při rekonstrukci pomocí stereoskopie, a to hledání korespondujících bodů, protože bude mít každá dvojice korespondujících bodů stejnou souřadnici  $v$  souřadných systémů kamer.

Vztah mezi souřadnicemi původních a rektifikovaných snímků vyjadřují rovnice 2.6 a 2.7. Tento vztah se nazývá projektivní transformace a má následující tvar:

$$u = \frac{a_1 u_{rec} + a_2 v_{rec} + a_3}{a_4 u_{rec} + a_5 v_{rec} + 1} \quad (2.6)$$

$$v = \frac{a_6 u_{rec} + a_7 v_{rec} + a_8}{a_4 u_{rec} + a_5 v_{rec} + 1} \quad (2.7)$$

kde  $(u, v)$  jsou obrazové souřadnice původního snímku,  $u_{rec}, v_{rec}$  jsou nehomogenní souřadnice rektifikovaného snímku [11]. Koeficienty  $a_1 \dots a_8$  je možné vypočítat, pokud je známa minimálně čtveřice korespondujících bodů. Projektivní transformace je aplikována na každý pixel obou snímků a výsledkem jsou rektifikované snímky [11]. Projektivní transformace má využití kromě prostorové rekonstrukce i při vytváření panoramatických snímků.

Jakmile jsou snímky rektifikovány, odpovídají konfiguraci kamer, která se nazývá standartní, nebo kanonický stereo pár. [9]. Optické osy obou zaznamenaných

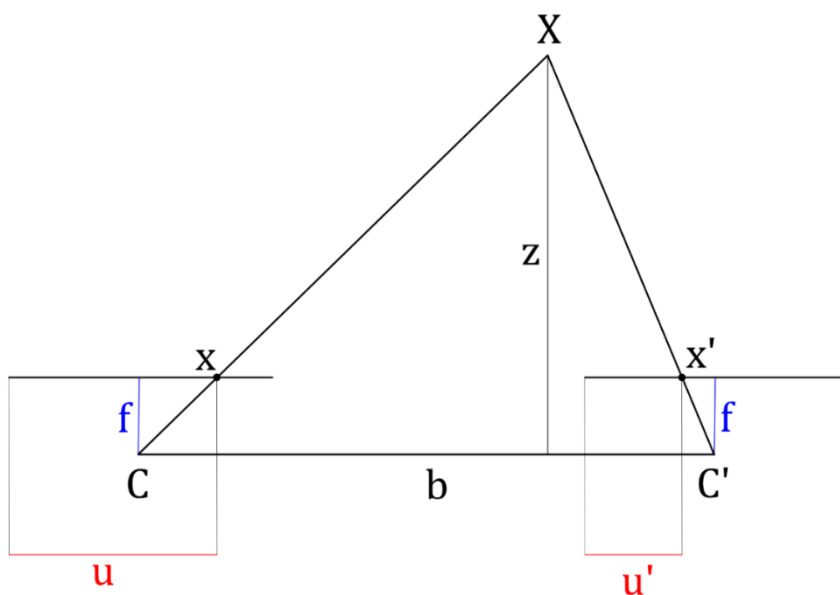
snímků jsou paralelní a při výpočtu bodu v prostoru  $X$  hraje roli disparita  $d$ , která odpovídá rozdílu souřadnic  $u$  a  $u'$  korespondujících bodů [3].

$$d = u - u' \quad (2.8)$$

Souřadnice rekonstruovaného bodu jsou pak následující:

$$x = \frac{-b(u + u')}{2d}, y = \frac{bv}{d}, z = \frac{bf}{d} \quad (2.9)$$

kde  $(x, y, z)$  jsou souřadnice bodu v prostoru,  $b$  je báze,  $d$  je disparita,  $f$  je ohnisková vzdálenost,  $(u, v)$  jsou souřadnice korespondujícího bodu na prvním snímku a  $(u', v)$  souřadnice korespondujícího bodu na druhém snímku. Hodnota souřadnice  $v$  se ve vztahu nerozlišuje, protože si je v obou případech rovna. Relativní chyba vypočtené hloubky se zvyšuje se snižující se disparitou  $d$ , prodloužení báze  $b$  naopak relativní chybu vypočteného  $z$  snižuje [3]. Počátek souřadnic je ve středu báze. Ohniskové vzdálenosti obou kamer si jsou rovny a střed snímku  $p$  je v centru kamery  $C$  [9].



Obr. 2.5 Rektifikovaný tvar (vychází z [3])

### 2.3.2 Fundamentální matice

Fundamentální matice  $F$  vyjadřuje vzájemnou pozici dvojice kamer při neznámých vnitřních parametrech [8]. Její uplatnění je zejména při rekonstrukci pomocí stereoskopie, kdy nejsou známy vnitřní, ani vnější parametry. Fundamentální matice je rozměru  $3 \times 3$  a pro každou dvojici korespondujících bodů  $x$  a  $x'$  splňuje rovnici 2.10 [4].

$$x'^T F x = 0 \quad (2.10)$$

Vztah 2.10 se nazývá epipolární omezení a často se uplatňuje při hledání korespondujících dvojic.

Pokud není možné kamery kalibrovat, to může nastat například v případě, kdy pořizování snímků neprobíhá v laboratoři, ale ve venkovním prostředí, je možné získat fundamentální matici pomocí metod zmíněných ve zbytku kapitoly. Metody se zejména liší počtem korespondujících bodů, které je nutné znát k aplikaci dané metody. Z fundamentální matice je pak možné dopočítat vnější parametry kamery.

Obvyklou metodou pro výpočet fundamentální matice je *eight-point algorithm* [12]. Jak název napovídá, pro použití je třeba znát alespoň osm korespondujících bodů. Předností metody je jednoduchý algoritmus, nevýhodou je vysoká citlivost na šum [4]. Metoda je uplatňována v případech, kdy jsou k výpočtu fundamentální matice použity uměle vytvořené body známého vzoru, u kterých je zajištěna správná detekce. V případě, kdy není snadné detekovat korespondující body mohou vzniknout dvojice, které si neodpovídají. V tomto případě je vhodné použití metody RANSAC (*Random sample consensus*) [13], případně její zobecnění MLESAC (*Maximum likelihood estimation sample consensus*) [14]. Zmíněné algoritmy se označují jako robustní, protože minimalizují počet odlehlých hodnot [4]. Minimální počet korespondujících bodů k použití metod je osm.

### 2.3.3 Esenciální matice

Pokud jsou známy vnitřní parametry kamery a dostatečný počet korespondujících bodů, je vhodné uplatnění esenciální matice  $E$ , která je rozměru  $3 \times 3$  a pro každou dvojici normalizovaných korespondujících bodů  $x_N$  a  $x'_N$  splňuje rovnici 2.11 [4].

$$x'_N{}^T E x_N = 0 \quad (2.11)$$

Za normalizované body se považují body na snímku upravené tak, aby respektovali kalibrační matice [8]. Uplatnění esenciální matice je v případě, kdy jsou známy vnitřní parametry, zatímco vnější ne. V tomto případě lze pomocí esenciální matice získat matice kamer  $P$  a  $P'$ . Podmínkou výpočtu esenciální matice je, stejně jako v předchozím případě, znalost určitého počtu korespondujících bodů. Při znalosti alespoň pěti bodů a vnitřních parametrů kamery lze dopočítat esenciální matici [8]. Metody pro výpočet esenciální matice jsou analogické k metodám výpočtu fundamentální matice.

## 3 METODY PROSTOROVÉ REKONSTRUKCE

Metody prostorové rekonstrukce slouží k určení prostorových souřadnic bodů zaznamenaných kamerou. Principy uvažovaných metod vychází především z epipolární geometrie. První popsaná metoda v kapitole je aktivní triangulace. Při jejím použití se na měřený objekt promítá laserový vzor, který je následně zaznamenán pomocí kamery. Následující metodou je stereoskopie, jejíž měřicí systém obsahuje dvojici kamer. Stereoskopie se zaměřuje na korespondující body, které bude představovat nasvícený vzor laserem zaznamenaný snímky dvojici kamer. Z korespondujících bodů se následně při znalostech pozice a orientace kamer vypočítají body v prostoru. Výsledné body v prostoru získané z metod prostorové rekonstrukce neodpovídají povrchu, který tvoří rekonstruovaná scéna. V závěru kapitoly budou uvedeny způsoby, jak z naměřených bodů vytvořit plochu definující výsledný 3D model.

Využití metod prostorové rekonstrukce, které zahrnují v měřicím systému kamery je pro objekty v nižší vzdálenosti než pět metrů. Při vyšší vzdálenosti se využívá měření doby letu laserového paprsku [15]. Vhodné uplatnění uvažovaných metod je například v lékařství, archeologii a při vývoji počítačových her.

### 3.1 Aktivní triangulace

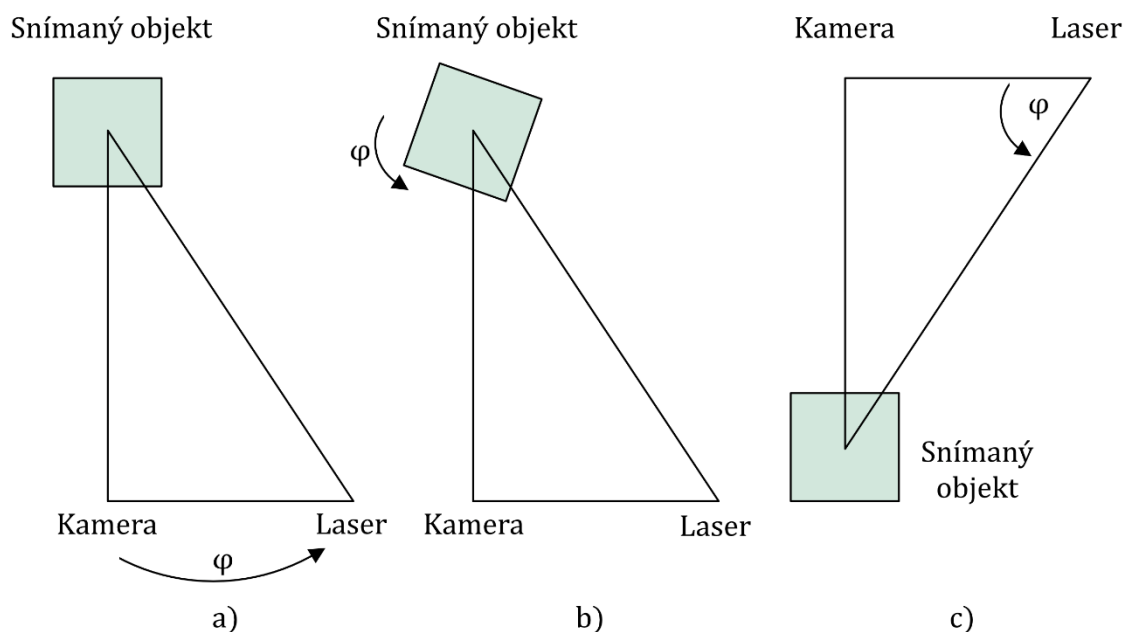
Aktivní triangulace je metoda prostorové rekonstrukce, která spočívá v promítání laserového paprsku na objekt. Paprsek je následně zaznamenán kamerou a vypočítá se hloubka zaznamenaných bodů pomocí triangulace.

Dvojici kamera a laser lze popsat analogicky pomocí epipolární geometrie (kapitola 2.3). V případě dvojice kamer je bod v prostoru průsečíkem optických paprsků kamer, v případě aktivní triangulace se jedná o průsečík optického paprsku kamery a paprsku vyzářeného laserem. Jedná se tak o metodu, kdy je známa pozice a orientace kamery a laseru a pro výpočet hloubky se uplatňují pravidla trigonometrie.

Metodu aktivní triangulace je možné klasifikovat podle použitého laserového vzoru, případně podle konfigurace měřicího systému. Laserový vzor může být například ve tvaru bodu, čáry, nebo kříže. Výhodou použití bodového vzoru je možnost detailněji nasvítit část objektu, která má složitější geometrii, než zbytek objektu a jeho snadná detekce. Nevýhodou vůči složitějším vzorům je množství zaznamenaných bodů v prostoru na snímek. Často aplikovaným tvarem je čára a v tomto textu se bude uvažovat její použití. V případě zájmu o použití složitějšího vzoru je vhodná aplikace metody strukturovaného světla, kdy se na objekt promítá složitější vzor pomocí projektoru.

Při klasifikaci podle konfigurace měřicího systému mohou nastat tři případy. Kamera a laser krouží kolem objektu (Obr. 3.1a), kamera a laser jsou na pevno a objekt

se otáčí (Obr. 3.1b) a objekt je snímán ze shora a mění se úhel pod kterým je vyzařován laserový vzor (Obr. 3.1c).



Obr. 3.1 a) Rozložení kdy kamera a laser krouží kolem snímaného objektu b) rozložení kdy se otáčí snímaný objekt c) rozložení, kdy je kamera a laser nad objektem a mění se sklon laseru

Variantu, kdy se pohybuje měřicí systém kolem snímaného objektu je vhodné aplikovat v případech, kdy není možné s objektem manipulovat. Případ, kdy se otáčí objekt je naopak vhodné použít, pokud lze objekt umístit na rotující platformu. Rozložení, kdy je objekt snímán ze shora se využívá například ve výrobních linkách. Uvažovaná konfigurace ve zbytku textu je pro otáčející se objekt, jedná se totiž o praktické rozložení pro měření v laboratorních podmínkách.

Postup při rekonstrukci pomocí aktivní triangulace lze rozdělit do následujících tří kroků:

1. Kalibrace kamery
2. Filtrace okolí laseru
3. Výpočet bodů v prostoru

V rámci kalibrace kamery je nutné pořídit referenční snímek, ze kterého se určí vzdálenost osy rotace. Další parametry, které je potřebné zajistit jsou báze  $b$  a úhel  $\beta$  (Obr. 3.2). Pokud není možné zajistit pravý úhel mezi bází a vzdáleností mezi kamerou a objektem je třeba zajistit i tento úhel.

### 3.1.1 Filtrace okolí laseru

Pro zajištění správného zpracování snímků je potřebné upravit snímek tak, aby na něm byl pouze laserem nasvícený vzor. Řešením tohoto problému může být použití metod pro detekci hran. Zmíněný způsob je vhodný v případě, kdy byly snímky pořízeny ve tmě a na snímku nejsou zachyceny žádné přesahy laseru vzniklé nasvícením okolí měřeného objektu. Při nesplnění předchozích podmínek se na snímcích může objevit rušení v podobě hran objektu a nasvíceného vzoru na okolí. Vhodné je použití filtru, který propustí pouze mohutnost určité RGB složky. Je tak možné odfiltrovat přesahy nasvíceného vzoru v případě, kdy mají nižší intenzitu než vzor na měřeném objektu. Při drobné úpravě zmíněného filtru se dá klasifikovat zaznamenaný vzor podle barvy. Využití zmíněné modifikace najde uplatnění v případě, kdy je na snímáný objekt promítáno více vzorů různé barvy pro získání většího množství bodů.

### 3.1.2 Výpočet bodů v prostoru

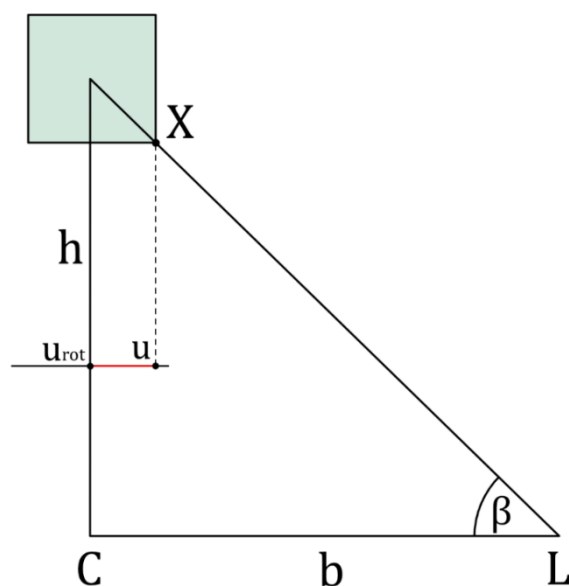
Při uspořádání, kdy kamera svírá kolmici s laserem a rekonstruovaným objektem (Obr. 3.2) je možné vzdálenost bodu od optického systému vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$h = u \cdot \tan(\beta) \cdot \frac{b}{f} \quad (3.1)$$

kde  $h$  je vzdálenost mezi kamerou a povrchem rekonstruovaného objektu,  $\beta$  je úhel svíraný mezi bází a osou rotace rekonstruovaného objektu [16]. Parametr  $b$  udává rozměr báze a  $f$  je ohnisková vzdálenost [3]. Při uvažování otáčejícího se objektu lze bod v prostoru vyjádřit pomocí válcového souřadného systému následovně:

$$\rho = (u_{rot} - u) \cdot \tan(\beta) \cdot \frac{b}{f}, \varphi = \frac{i2\pi}{n}, z = \frac{bv}{f} \quad (3.2)$$

kde  $\rho$  je sférická souřadnice odpovídající vzdálenosti rekonstruovaného bodu od osy rotace.  $u_{rot}$  je souřadnice  $u$  osy rotace a  $u$  je nasvícený bod na snímáném objektu zachycený na snímku kamery.  $\varphi$  je úhel, pod kterým je natočený snímáný objekt,  $n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ) je počet natočení a  $i$  ( $i \in \mathbb{N}$ ) je aktuální natočení objektu. Souřadnice  $z$  udává výšku objektu a souřadnice  $v$  odpovídá souřadnici  $v$  zaznamenaného bodu na snímku kamery.



Obr. 3.2 Princip aktivní triangulace

### 3.1.3 Výhody a nevýhody

Hlavní výhodou aktivní triangulace je její jednoduchý algoritmus. Samotný výpočet bodů v prostoru pak trvá krátký čas. V měřicím systému je pouze jedna kamera a laser, to se jeví jako výhoda z ekonomického hlediska. Hlavní výhodou nasvíceného vzoru je množství zaznamenaných bodů, které je mnohonásobně vyšší oproti pasivním metodám.

Nevýhodou je podmínka použití laseru, který není vhodný pro všechny povrchy. Intenzita laserového paprsku musí být omezena, pokud jsou rekonstruovány zvířata, nebo lidé. Laserové záření je totiž nebezpečné pro zrak. Problémové je i měření ve venkovním prostředí, kdy může být laserový paprsek zastíněn slunečním zářením. Další nevýhodou může být nutnost znát triangulační úhel a bázi. Velmi problémové je zachycení barevné informace rekonstruovaných bodů, která se nasvícením laserového vzoru ztrácí.

## 3.2 Stereoskopie

Následující kapitola se zabývá rekonstrukcí pomocí metody zvané stereoskopie. Její princip vychází z epipolární geometrie, které byla věnována kapitola 2.3, v měřicím systému je proto dvojice kamer. Dále budou uplatňovány poznatky o modelu kamery popsaném v kapitole 2.2. a bude využíváno řady souřadných systému popsaných v kapitole 2.1. Jelikož je měřicí systém obohacen laserem, bude princip stereoskopie částečně modifikován.

Při rekonstrukci pomocí stereoskopie budou uvažovány dvě možnosti vzájemného vztahu mezi snímanou scénou a měřicím systémem. První z nich nastane, pokud je snímán otáčející se objekt. Toho může být docíleno například umístěním



objektu na rotující platformu. Maximální možný rozměr, kterého může rekonstruovaný objekt nabývat je omezen velikostí platformy, jenž může být zhotovena. Taktéž nelze rekonstruovat objekty, se kterými nelze hýbat. Proto je tato metoda vhodná pro malé objekty, které je možné bezpečně přemístit na rotující platformu.

Druhá uvažovaná situace nastane, pokud je snímáný objekt v klidném stavu a pohybuje se naopak měřicí systém. Zmíněnou variantu lze použít jak pro malé, tak velké objekty. Při použití je nutné zajistit, aby bylo možné pořizovat snímky z okolí objektu. Zmíněná varianta bude uvažována pro objekty, se kterými nelze manipulovat, například sochy, nebo domy. Jelikož se takové objekty nachází většinou ve venkovním prostředí nemusí být měřicí systém obsahující laser vhodný z důvodů rušivých slunečních paprsků. Princip bude přesto popsán, protože při snížených světelných podmínkách je možné metodu aplikovat.

Ve zbytku kapitoly bude popsán možný postup při rekonstrukci pomocí stereoskopie. Postup se dá rozčlenit do následujících tří kroků:

1. Určení relativní pozice kamer
2. Zjištění korespondujících bodů
3. Rekonstrukce korespondujících bodů

### **3.2.1 Určení pozice kamer**

V případě, kdy dochází k rekonstrukci otáčejícího se objektu na rotující platformě, jsou pozice kamer známy pomocí kalibrace kamer popsané v kapitole 2.2.3.

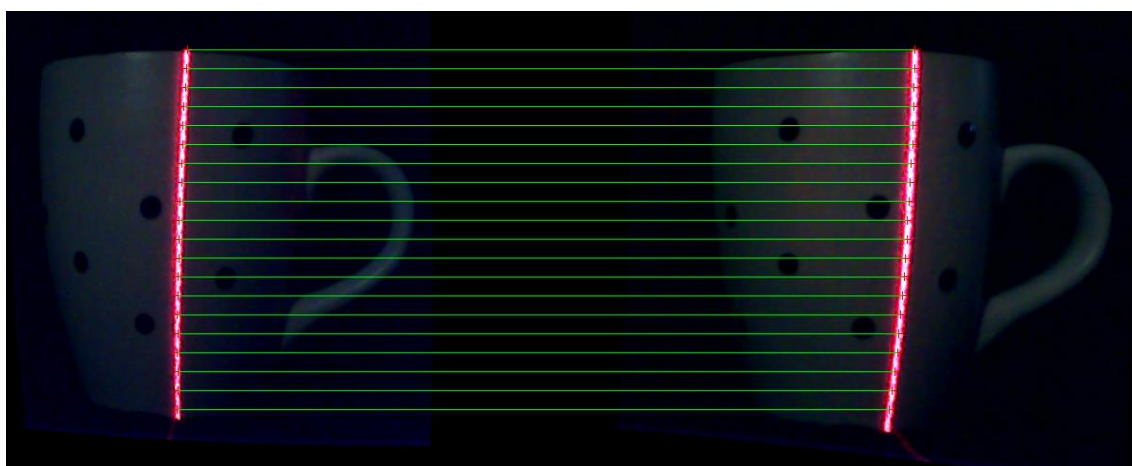
Při uvažování objektu, který je v klidu a mění se pozice kamer je nutné vypočítat orientaci kamer při každé jejich změně. Aby nebylo nutné provádět při každé změně pozice kamer jejich kalibraci se do měřicího systému umístí známý vzor. Tento vzor pak bude představovat například počátek souřadného systému. Pokud by známý vzor zastínil rekonstruovaný objekt z pohledů kamer se pořídí jeden snímek se známým vzorem a pro pořizování snímků s nasvíceným laserovým vzorem se známý vzor odebere. Pro určení relativní pozice musí být detekovány alespoň čtyři body [17]. Body na vzoru mohou posloužit i pro výpočet vzájemné pozice každé dvojice kamer. Při dostatečném počtu korespondujících bodů lze vypočítat fundamentální matici, případně esenciální matici při známých vnitřních parametrech a z nich matice kamer definující jejich pozici a orientaci.

### **3.2.2 Hledání korespondujících bodů**

Aby bylo možné daný bod rekonstruovat je nutné, aby byl viditelný z obou pohledů. Proto je vhodné vyřadit všechny body, které nemají svoji korespondující dvojici. To může nastat například tehdy, pokud je daný bod zastíněn geometrií rekonstruovaného objektu a je viditelný pouze z jednoho pohledu. Zmíněný problém nastává většinou při

příliš dlouhé bázi. Jelikož je hledání korespondujících bodů zásadním faktorem při rekonstrukci pomocí stereoskopie jsou definována pravidla, která musí splňovat každá korespondující dvojice. Jedná se například o epipolární omezení (vztah 2.10), ze kterého plyne, že korespondující bod na jednom snímku může ležet pouze na epipolární přímce na druhém snímku. Unikátní omezení udává, že každý bod na jednom snímku může být korespondující bod nanejvýš jednoho bodu na druhém snímku. Omezujících pravidel je podstatně více, nicméně pokud je v měřicím systému obsažen laser, není nutné se většinou z nich zabývat. Více pravidel je detailněji popsáno v literatuře [3], případně [9].

Pokud je v měřicím systému laser je výhodné převést pár snímků do rektifikovaného tvaru. V případě že je nasvícený vzor čára, vzniknou na obou snímcích vzory, které mají nejen stejnou souřadnici  $v$  v obou pohledech, ale každá souřadnice  $v$  obsahuje nanejvýš jeden korespondující bod (Obr. 3.3). To platí při uvažování ideálně tenkého laserového vzoru, jehož tloušťka odpovídá přesně jednomu pixelu na snímku. V reálném případě je proto uvažována střední hodnota tloušťky laserového vzoru.



Obr. 3.3 Korespondující body rektifikovaných snímků

### 3.2.3 Rekonstrukce korespondujících bodů

Rekonstrukce korespondujících bodů lze dosáhnout pomocí dvou metod. Při první z nich se využívá pravidel epipolární geometrie. Korespondující body leží na epipolárních přímkách protějšího pohledu. Po zpětné projekci paprsku procházejícím centrem kamery  $C$  a korespondujícím bodem  $x$ , stejně tak  $C'$  a  $x'$ , jsou získány paprsky, které se protnou v bodě  $X$  (Obr. 2.4). Souřadnice tohoto bodu odpovídají rekonstruovanému bodu [5]. Paprsky se ve skutečnosti neprotnou, zejména kvůli šumu, který je obsažen na snímcích. Bod v prostoru se proto vypočítá jako bod, který je nejbližší k oběma paprskům. Jedná se pak o bod, který je uprostřed nejkratší přímky spojující dané paprsky [3]. Další možností je použití metody DLT (*Direct linear transformation*), kdy se bod v prostoru získá řešením soustavy lineárních homogenních rovnic, které

představují matice kamer a korespondující body [4]. Tento přístup je vhodné uplatnit v případě, kdy nejsou kalibrovány kamery a mění se jejich relativní pozice, protože se uplatňují při výpočtu matice kamer, které lze získat z fundamentální, případně esenciální matice.

V případě otáčejícího se objektu je uplatněn značně jednodušší princip. Pokud byly korespondující body nalezeny způsobem popsaným v kapitole 3.2.2. To znamená uplatněním rektifikace snímků, jsou snímky v kanonickém tvaru a lze tak uplatnit vztah 2.9 pro výpočet bodů v prostoru.

$$x = \frac{-b(u + u')}{2d}, y = \frac{bv}{d}, z = \frac{bf}{d} \quad (2.9)$$

Vypočtené souřadnice z rovnice 2.9 lze převést do tvaru definovaného každým natočením snímaného objektu. Toho může být docíleno vyjádřením pomocí válcového souřadného systému. Aby bylo možné uplatnit tento princip je potřeba znát vzdálenost osy rotace snímaného objektu od kamery. Uvažuje se taktéž, že se objekt otáčí s pevně stanoveným krokem, toho je docíleno postavením rekonstruovaného objektu na rotující platformu. Zaznamenaný bod v prostoru má pro každé natočení snímaného objektu následující tvar:

$$\rho = z_{rot} - z, \varphi = \frac{i2\pi}{n}, z_v = y \quad (3.3)$$

kde  $\rho$  je sférická souřadnice odpovídající vzdálenosti rekonstruovaného bodu  $z$  od osy rotace  $z_{rot}$ .  $\varphi$  je úhel, pod kterým je natočený snímaný objekt,  $n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ) je celkový počet snímků a  $i$  ( $i \in \mathbb{N}$ ) je aktuální natočení objektu. Souřadnice  $z_v$  udává výšku objektu vyjádřenou ve válcovém souřadném systému, zatímco souřadnice  $y$  udává výšku objektu získanou ze vzorce 2.9. Souřadnice  $z$  ze vztahů 2.9 a 3.3 si neodpovídají, protože v případě rektifikovaného tvaru udává souřadnice  $z$  vzdálenost bodu od optického systému. V případě válcového souřadného systému se jedná o jeho výšku. K rotujícímu objektu se přistupuje podobně jako při rekonstrukci pomocí aktivní triangulace v kapitole 3.1. Liší se způsob, jakým je získána informace o hloubce.

### 3.2.4 Výhody a nevýhody

Obecné výhody a nevýhody spjaté se zařazením laseru do měřicího systému jsou obdobné jako u metody aktivní triangulace popsané v kapitole 3.1.3. Kapitola se proto zaměří na porovnání s nemodifikovanou metodou stereoskopie.

Hlavní výhodou vůči nemodifikované stereoskopii je řešení problémů spojených s hledáním korespondujících bodů. Při uvažování klasické stereoskopie je velmi obtížné zrekonstruovat objekt, který má málo hran, nebo jednoduchou texturu. Není zaručeno, že se podaří detekovat body po celé ploše objektu, a tak často vznikají prázdná místa v modelu. Modifikovaná varianta řeší hlavně tento problém. Dále je možné se zaměřit na část objektu, která má složitější geometrii. Například při skenování sochy lze věnovat větší pozornost nasvícení obličej, pro jehož rekonstrukci je třeba značně více bodů než pro zbylý povrch sochy.

### 3.3 Reprezentace 3D modelů

Výstupem metod prostorové rekonstrukce popsaných v předchozích kapitolách jsou body v prostoru, které jsou často nazývané mračno bodů. Aby z těchto bodů vznikl 3D model, je třeba body vhodným způsobem proložit. Proložením bodů vzniknou křivky, které jsou vyjádřeny pomocí matematických funkcí. Z vyjádřených funkcí je možné vybrat body, které budou reprezentovat vrcholy modelu. Vhodným propojením vrcholů pomocí hran vznikne síť mnohoúhelníků reprezentující povrch 3D modelu. Nejčastější reprezentace mnohoúhelníkových ploch je pomocí trojúhelníků a čtyřúhelníků. Na modely lze dále aplikovat texturu, která definuje barvu objektu. K aplikaci textur na mnohoúhelníkové plochy slouží mapování textur, případně lze definovat barvu mnohoúhelníků pomocí vrcholů, jejichž barva je zachycena na snímcích.

Pokud má objekt složitý tvar, je možné že nastane případ, kdy je obtížné vygenerovat mnohoúhelníkovou plochu odpovídající geometrii objektu. V tomto případě je výsledný model reprezentován přímo mračnem bodů získaným z metod prostorové rekonstrukce. Body není nutné prokládat křivkami. Pro aplikaci textur má každý bod barvu získanou ze snímků při rekonstrukci, pokud to zvolená metoda dovoluje.

#### 3.3.1 Křivky

Křivky slouží k proložení množiny bodů matematickou funkcí. Základním vyjádřením křivky je pomocí polynomu. Taková křivka se pak nazývá polynomiální [2]. Ve zbytku textu budou uvažovány zejména křivky polynomiální. Křivky jsou buď aproximační, nebo interpolační. Aproximační křivka nemusí procházet všemi body, které mají být proloženy, zatímco interpolační křivka všemi prochází [2]. Při prostorové rekonstrukci není zajištěno, že veškeré body odpovídají geometrii objektu, ať už kvůli šumu obsaženému na snímcích, nebo kvůli rekonstrukci okolí snímaného objektu. Proto je vhodné použití aproximační křivky. Za předpokladu, že odpovídajících bodů je mnohonásobně více než bodů, které neodpovídají se bude křivka málo vychylovat od odpovídajících bodů.

Při vyjádření křivky reprezentující nasvícený vzor při rekonstrukci otáčejícího se objektu je možné se omezit pouze na dva rozměry, protože veškeré body, které jsou nasvíceny vertikální čarou mají společnou souřadnici  $x$ . Křivka  $z = f(y)$  pak bude vyjadřovat vzájemnou závislost souřadnic  $y$  a  $z$ . Pokud má objekt složitou geometrii je vhodné namísto jedné křivky na nasvícený vzor použít křivek více. Definuje se  $n$  úseků, kde každý úsek je definován jinou křivkou. V případě použití polynomiálních křivek se pak křivka nazývá po částech polynomiální [2].

### 3.3.1.1 Polynomiální křivky

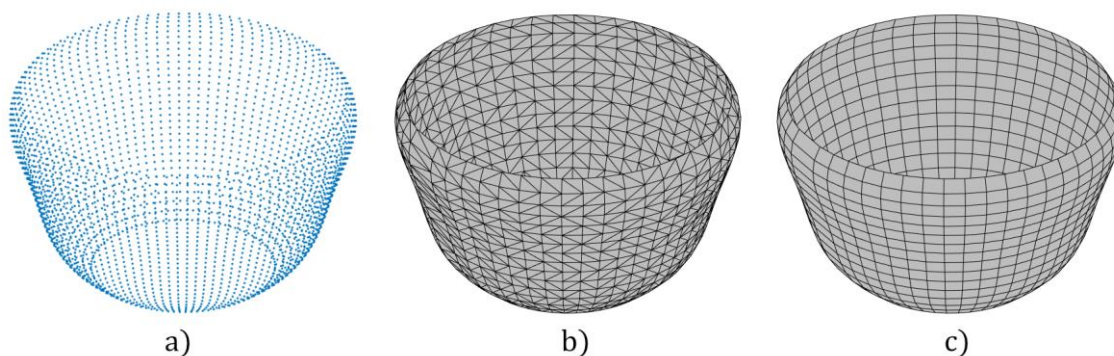
Polynomiální křivka vznikne proložením bodů polynomem. Polynomiální křivky se mezi sebou liší řádem polynomu. Obecný tvar takové křivky je:

$$p(t) = a_1 t^n + a_2 t^{n-1} + \dots + a_n t + a_{n+1} \quad (3.4)$$

kde  $p(t)$  je polynomiální křivka závislá na parametru  $t$  ( $t \in \mathbb{R}$ ),  $n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ) je její řád.

### 3.3.2 Povrchy

Povrch objektu lze definovat pomocí sítě mnohoúhelníků. Nejčastěji jsou vrcholy propojeny trojúhelníky, protože tři body definující trojúhelník leží vždy ve stejné rovině [18]. Oblíbenou reprezentací, zejména v modelovacích programech, je pomocí čtyřúhelníků. Reprezentace pomocí pěti a více úhelníků se složitěji generuje a je nepraktická při manipulaci s modelem. Proto se často volí reprezentace pomocí trojúhelníků a čtyřúhelníků. V zásadě se nejedná o příliš velké omezení, protože jakýkoliv mnohoúhelník lze rozdělit na trojúhelníky [19]. Další možnou variantou je bodová reprezentace.



Obr. 3.4 Reprezentace povrchů a) bodová b) trojúhelníková c) čtyřúhelníková

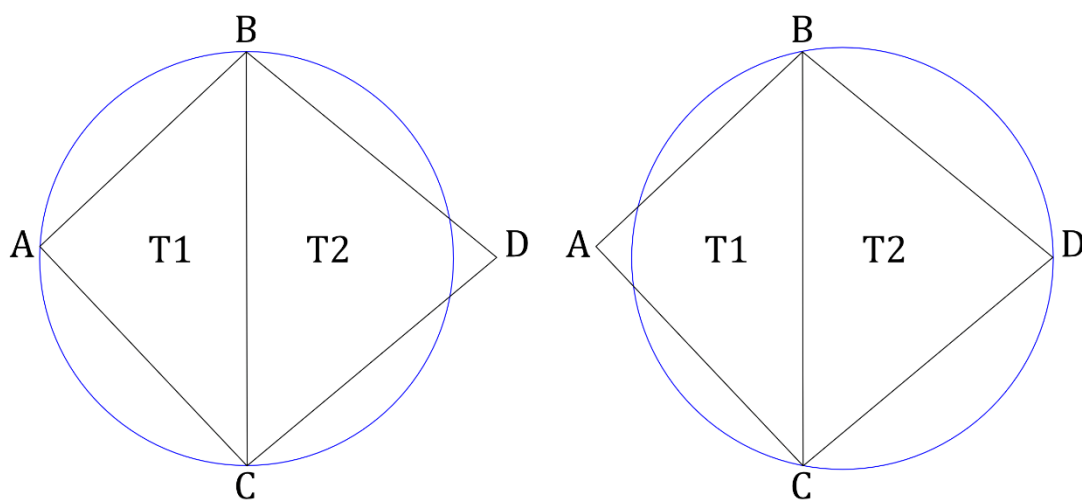
#### 3.3.2.1 Bodová reprezentace

Při bodové reprezentaci je povrch modelu reprezentován body získanými z metod prostorové rekonstrukce. Jedná se o nejjednodušší způsob vytvoření prostorového

modelu a jeho uplatnění je právě při zobrazení modelů získaných prostorovou rekonstrukcí. Protože je objekt reprezentován mračnem bodů není nutné získané body nijak upravovat. Hlavní výhodou je kromě jednoduchosti možnost přidělení každému bodu barevnou informaci získanou při rekonstrukci. Nevýhodou je hlavně náročnost na paměť. Další nevýhodou jsou prázdná místa modelu, která vznikají při malém počtu bodů získaných při rekonstrukci. Může nastat případ, kdy nebylo možné zaznamenat celou geometrii objektu, ať už že byla zastíněna jinými objekty, nebo vlastní geometrií. Často se tak volí reprezentace pomocí mnohoúhelníků. Přesto může bodová reprezentace své uplatnění nalézt například při uchovávání památek v elektronické podobě, případně pokud má objekt složitý tvar pro generování mnohoúhelníkové plochy.

### 3.3.2.2 Trojúhelníková reprezentace

Trojúhelníková reprezentace vznikne propojením tří vrcholů hranami. Trojúhelníkové plochy se mezi sebou navzájem liší zejména podle způsobu vyplňování. Často používanou metodou, k vyplňování pomocí trojúhelníků je Delaunayova triangulace. Při jejím použití nesmí být uvnitř kružnice tvořené trojicí bodů definující trojúhelník žádný jiný bod (Obr. 3.5). Následkem tohoto omezení jsou upřednostňovány trojúhelníky s vyššími vnitřními úhly, což se kladně projeví na tvaru výsledného modelu [20].



Obr. 3.5 Delaunayova triangulace [20]

### 3.3.2.3 Čtyřúhelníková reprezentace

Další často používanou reprezentací ploch je pomocí čtyřúhelníků. Přestože je generování čtyřúhelníkové sítě složitější než trojúhelníkové, přináší tato reprezentace řadu výhod. Struktura čtyřúhelníkového modelu je vhodná například při použití dělení povrchů, mapování textur a počítačové animaci [21].

Pro vytvoření čtyřúhelníkové sítě se dá pro body získané rekonstrukcí otáčejícího se objektu prakticky využít vyjádření mračna bodů pomocí křivek.

Proložením bodů reprezentujících nasvícený vzor ve tvaru čáry křivkami se definují po určitých intervalech vrcholy. Spojením sousedících vrcholů vzniklých na křivkách hranami vzniknou výsledné čtyřúhelníkové plochy po obvodu modelu.

### 3.3.3 Textury

Textury slouží k vyplnění povrchu modelu barvou, aby vypadal reálněji. Způsoby, jakými se textura nanáší na model se zejména liší podle toho, jak je model reprezentován. V případě mračna bodů je přiřazena barevná informace každému bodu v prostoru. Tato informace se získá ze snímku zachycující objekt. Pokud byl bod získán nasvícením laserovým vzorem je potřeba zaznamenat snímek ze stejného pohledu bez nasvíceného vzoru. Vzhledem k tomu, že jsou známy souřadnice na snímku daného bodu, je možné tentýž bod nalézt na barevném snímku a určit jeho barvu. Praktickým řešením je rozdělení snímku na RGB složky a následným zaznamenáním mohutnosti každé složky. Pokud je model reprezentován pomocí mnohoúhelníků je možné využít zmíněný princip a barevnou informaci přiřadit vrcholům modelu. V případě, kdy bylo při generování modelu využito proložení bodu křivkami může být problém zajistit správnou barevnou informaci na vrcholech vzniklých definováním bodů na křivkách. Zmíněný postup je proto vhodný, pokud vrcholy tvoří přímo naměřené body. Dalším způsobem aplikovaným na mnohoúhelníkové plochy je mapování textur. Textura může být v tomto případě pravidelná, nebo nepravidelná [2]. Nepravidelná textura se obalí jako celek na povrchu modelu. Pravidelná textura vyplní povrch modelu opakujícím se vzorem.

### 3.3.4 Formáty

Pro uložení prostorového modelu je k dispozici řada formátů. Mezi nejpoužívanější patří STL (*Stereolithography*), OBJ (*Object file format*) a PLY (*Polygon file format*). Formát STL aproximuje 3D model na trojúhelníkové plochy. Je jednoduchý a podporovaný skoro všemi softwary pro práci s prostorovými modely. Jeho nevýhodou je, že nezachovává informaci o textuře a měřítku [22]. Často je uplatňován u modelů sloužících k 3D tisku. Modely uložené ve formátu OBJ mohou být reprezentovány mnohoúhelníky, i komplexními povrchy, jimiž jsou například Bézierovy a Taylorovy plochy. Dále je možné zachovat informaci o měřítku a textury [23]. Formát PLY byl vytvořen pro práci s modely získanými při prostorové rekonstrukci, a právě k tomu je nejčastěji využíván. Jedná se o jednodušší variantu formátu OBJ [22]. Umožňuje uchovat kromě vrcholů i barevnou informaci [24]. Je vhodný pro uložení modelů tvořených pomocí trojúhelníkových ploch i mračnem bodů.

## 4 MĚŘICÍ PRACOVISTĚ

Měřicí pracoviště slouží k pořízení snímků potřebných k aplikaci metod prostorové rekonstrukce. Rozložení komponent se v zásadě liší podle použité metody. Při použití stereoskopie je v měřicím systému o kameru více než při rekonstrukci pomocí aktivní triangulace. Pozice laseru se mění tak, aby rozložení komponent odpovídalo principům popsaným v předchozích kapitolách.

V kapitole budou uvedeny požadavky kladené na měřicí pracoviště v závislosti na vlastnostech rekonstruovaného objektu. Vzájemná pozice optického systému má vliv na přesnost a oblast, kterou je možné detekovat. Další část kapitoly bude zaměřena na tuto problematiku. Závěrem kapitoly budou uvedena možná uspořádání měřicího pracoviště a budou popsány obsažené komponenty.

### 4.1 Požadavky

Na měřicí systém je možné klást požadavky podle různých kritérií, jimiž může být například použitý princip, nebo přesnost dílčích komponent. Největší požadavky na měřicí pracoviště jsou kladeny v závislosti na vlastnostech měřeného objektu. Pracoviště se mění jak v závislosti na rozměru, tak na materiálu objektu. Oba problémy budou popsány v následující části kapitoly.

#### 4.1.1 Rozměr objektu

Měřicí pracoviště se mění v závislosti na rozměru a možnosti s objektem manipulovat. Nastanou tak dvě situace, podle kterých se mění jeho rozložení. Objekt je možné dopravit do laboratoře a umístit ho na rotující platformu. To znamená, že se sním dá manipulovat, nicméně jeho rozměry jsou limitovány rozměry rotující platformy. Další případ nastane, pokud s objektem nelze manipulovat. Důvodem může být, že je připevněný, nebo velké rozměry a váha. V tomto případě se musí přemístit měřicí pracoviště k měřenému objektu a na rozdíl od předchozího případu se neotáčí objekt, ale měřicí systém se pohybuje kolem objektu.

#### 4.1.2 Materiál objektu

Materiál objektu hraje zásadní roli při rekonstrukci za pomoci nasvícení laserovým vzorem. Pro některé materiály je použití laseru žádoucí, nicméně existují i případy, kdy je vhodná volba principu nezahrnující laser. Nevhodné materiály jsou takové, které pohlcují, nebo odrážejí světlo. Jedná se většinou o objekty, které mají černou barvu, nebo jsou skleněné.



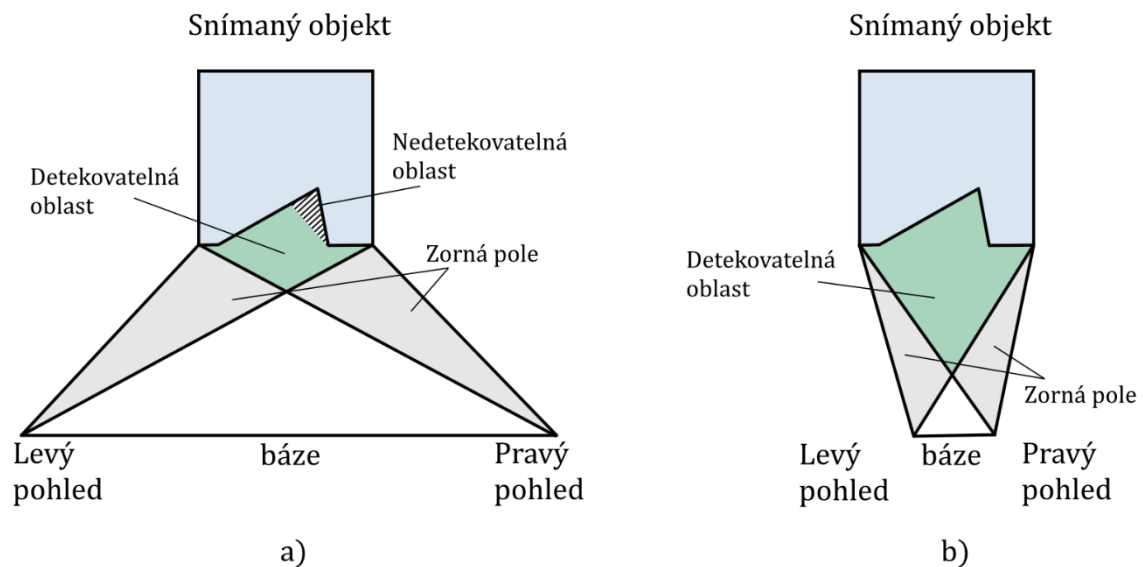
## 4.2 Uspořádání optického systému

Při volbě uspořádání optického systému jsou kladeny dva požadavky. Jedná se o přesnost a množství zaznamenaných bodů. Zásadní vliv na tyto požadavky mají dva parametry. Jedná se o rozměr báze a vzdálenost objektu od optického systému. Zmíněné požadavky si navzájem odporují. Při zvýšení přesnosti se zmenší počet zaznamenaných bodů. Řešením je kompromis, kdy je zaznamenáno potřebné množství bodů při nízkém zhoršení přesnosti. Principy budou z důvodu přehlednosti uvedeny pro měřicí systém obsahující dvojici kamer. Při uvažování laseru a kamery jsou principy obdobné.

### 4.2.1 Rozměr báze

Vhodného poměru množství zaznamenaných bodů a přesnosti je možné docílit volbou rozměru báze. Při zvyšující se bázi se zvýší rozlišení disparity a tím i přesnost zaznamenaných bodů. Naopak se sníží maximální možná zaznamenaná hloubka. Zvýšením báze se mohou objevit nedetekovatelné oblasti vzniklé zastíněním bodů vlastní geometrií. Rozměr báze se proto volí co nejvyšší možný, při kterém dochází k minimálnímu zastínění bodů.

Při volbě rozměru báze záleží na tvaru snímaného objektu, jeho rozměrech a zvolené metodě. Není daná univerzální hodnota vhodná pro všechny optické systémy a snímané objekty. Při použití metody, kdy se mění pozice kamer je možné nedetekovatelné body zaznamenat z jiného pohledu a rozměr báze nemusí být zásadně snížen.



Obr. 4.1 Vliv rozměru báze na množství detekovaných bodů a) dlouhá báze b) krátká báze

### 4.2.2 Vzdálenost objektu od optického systému

Dalším aspektem určujícím množství zaznamenaných bodů a jejich přesnost je vzdálenost snímaného objektu od optického systému. Pokud je objekt blízko měřicímu systému mohou vznikat nedetekovatelné oblasti. Při zvýšení vzdálenosti kamer od objektu se sníží počet zastíněných bodů. Sníží se i přesnost, protože snímaný objekt zabírá nižší plochu na snímku a je definován nižším počtem pixelů.

## 4.3 Volba optického systému

S rozdílnými požadavky na měřicí systém zapříčiněnými vlastnostmi snímaného objektu je měřicí pracoviště rozděleno na dvě varianty. První z nich je pro laboratorní měření a druhá pro venkovní měření.

Cílem bylo vytvořit hardwarově dostupné měřicí pracoviště pro domácí skenování při zajištění dobré kvality. Při použití v průmyslu by byly komponenty nahrazeny kvalitnějšími. Namísto webkamer by byly použity průmyslové kamery. Použitý laser by vyzařoval vzor s nižší tloušťkou a rotující platforma by měla větší nosnost a rozlišení natočení.

### 4.3.1 Laboratorní měření

Měřicí systém pro laboratorní měření je složen z dvojice webkamer s rozlišením 640×480 připevněných na stativěch a laseru, který má čočku upravenou tak, že vyzařuje vzor ve tvaru čáry. Laser je připevněn na železném stojanu s nastavitelnou výškou. Na stojan je možné připevnit dvojici laserů, navzájem je posouvat v horizontálním směru a měnit úhel pod kterým vyzařují paprsek na měřený objekt. K napájení laserů slouží připevněná baterie. Stojan je jak z kompaktnosti, tak z konstrukčního hlediska vhodný i pro venkovní měření. Další komponentou je rotující platforma, kterou představuje otočný stolek vytištěný na 3D tiskárně připevněný ke krokovému motoru. Průměr otočného stolku, jenž byl omezen tisknutelnou plochou 3D tiskárny, je 195 mm. Na otočném stolku je vyznačen střed, aby bylo možné umístit objekt přímo doprostřed a nedocházelo tak k hrubým chybám zapříčiněným chybnou registrací osy rotace. Úhel, o který se motor otočí během jednoho kroku je 1,8°, je tak možné pořídit snímky pro 200 natočení měřeného objektu [25]. Krokový motor je řízen Raspberry Pi pomocí integrovaného obvodu DRV8825 a napájen ze stabilizovaného zdroje napětí. Za rotující platformou je vyvěšeno černé plátno. Plátno i otočný stolek mají černou barvu z důvodu, aby pohltily laserové záření a šlo tak odfiltrovat okolí měřeného objektu od nasvíceného vzoru. Možné konfigurace měřicího pracoviště pro laboratorní měření jsou znázorněny na obrázcích Obr. 4.3a a Obr. 4.2b. Uspořádání se navzájem liší podle použité metody prostorové rekonstrukce.



a)

b)

Obr. 4.2 Laboratorní měřicí pracoviště a) při rekonstrukci pomocí aktivní triangulace b) při rekonstrukci pomocí stereoskopie

Při pořizování velkého počtu snímků je žádoucí, aby probíhalo automaticky. Proto je možné připojit webkamery k Raspberry Pi, pořizování snímků pak probíhá v krátkých přestávkách po definovaném počtu kroků. Další možností je připojení webkamery přímo k počítači, na kterém se snímky budou zpracovávat. V tomto případě zařízení Raspberry Pi pouze otáčí s motorem a na počítači, ke kterému jsou připojeny webkamery běží program pořizující snímky po definovaném časovém intervalu.

### 4.3.2 Venkovní měření

Při venkovním měření je počet komponent značně nižší, a to kvůli absenci rotující platformy. V měřicím systému tak zůstává pouze dvojice kamer na stativěch a laser připevněný na železném stojanu. Pokud není z praktického hlediska vhodné použití webkamer mohou být na stativy namísto webkamer připevněny fotoaparáty. Venkovní měřicí systém obsahuje oproti laboratornímu také známý vzor k určení relativní pozice kamer, při jejich změně pozice.



Obr. 4.3 Venkovní měřicí pracoviště

## 5 REALIZACE METOD

V předchozí kapitole bylo prezentováno měřicí pracoviště, které má za úkol pořízení snímků potřebných k aplikaci metod prostorové rekonstrukce. Snímky mohou být pořízeny v laboratorních podmínkách kdy se otáčí objekt. Pro tento případ byly navrženy dva algoritmy. První využívá principu aktivní triangulace a druhý principu stereoskopie při kalibrované dvojici kamer. Další uvažovanou možností jsou pořízené snímky z venkovního prostředí, kdy se mění pozice kamer. Pro řešení toho problému je znovu využito principu stereoskopie, nicméně tentokrát jsou známy pouze vnitřní parametry kamer. Závěrem kapitoly jsou uvedeny navržené korekční algoritmy, které využívají znalosti o tvaru objektu ke korekci rekonstruovaných bodů.

K realizaci metod prostorové rekonstrukce bylo zvoleno vývojové prostředí MATLAB. Tento nástroj byl vybrán hlavně z důvodu kompaktní práce s maticemi. Další předností je knihovna Computer Vision Toolbox [26], které bylo při implementaci využíváno. Veškeré navržené zdrojové soubory jsou součástí přílohy na CD. Pomocí skriptu *reconstruction.m* lze otestovat navržené metody snímající otáčející se objekt a pomocí skriptu *uncalibratedStereoVision.m* metodu, při které se mění pozice kamer.

Veškeré navržené metody mají společnou úvodní a závěrečnou část. V úvodu jsou zadány vstupní parametry, jimiž jsou pořízené snímky, případné kalibrační matice, intenzita použitého filtru, způsob zobrazení výsledného modelu a zda má být na výsledný model aplikována jedna z korekcí popsaných v kapitole 5.4. Použitý filtr slouží k odstínění okolí od nasvíceného laserového vzoru a propouští pouze pixely, které mají mohutnější červenou složku barevného RGB modelu, než je zadaná intenzita. Protože nasvícený vzor není dostatečně tenký, aby tloušťka vzoru odpovídala po filtraci jednomu pixelu je uvažována střední hodnota tloušťky nasvíceného vzoru. Při volbě zobrazení výsledného modelu je možné vybrat, zda mají být naměřené body proloženy křivkami v plném rozsahu, případně po částech. Na body proložené křivkami jsou následně aplikovány zvolené korekční algoritmy. Výsledná zobrazení mohou být pomocí naměřených bodů, proložené body křivkami a sítě mnohoúhelníků. Mnohoúhelníkové plochy jsou buď trojúhelníkové, kdy je uplatněn způsob vyplňování pomocí Delaunayovy triangulace nebo čtyřúhelníkové. Generování sítě pak probíhá pomocí způsobu popsaném v kapitole 3.3.2.3. Na prostorové modely jsou především kvůli úsporám výpočetního výkonu a paměti kladeny požadavky, aby měl co nejméně vrcholů. Proto je definován navíc jeden parametr, který udává maximální počet vrcholů, jenž má výsledný model mít. Počet vrcholů vzniklých na křivkách je pak omezen tímto parametrem. Mračno bodů je možné uložit ve formátu PLY.

## 5.1 Aktivní triangulace

Algoritmus pro realizaci metody aktivní triangulace je navržený pro situaci, kdy se otáčí rekonstruovaný objekt. Laser a kamera nemění svoji pozici. Při rekonstrukci je uvažováno laboratorní prostředí popsané v kapitole 4.3.1. Jako vstupní parametry slouží pořízené snímky, přičemž první je referenční, který zachycuje osu rotace. Ostatní snímky zachycují rekonstruovaný objekt s nasvíceným vzorem. Dalšími vstupními parametry jsou úhel, pod kterým je vyzařován laserový vzor a rozměr báze. Navržený algoritmus postupně prochází každý řádek matice definující zaznamenaný snímek, dokud nedetekuje bod, jehož původem je nasvícený vzor a následně vyhodnotí souřadnice bodu v prostoru podle vztahu 3.2. Zmíněný postup se provede jednou pro zjištění souřadnic osy rotace a následně pro každý snímek s proměnným natočením objektu. Pokud jsou k dispozici snímky zachycující barevnou informaci o objektu, je z nich extrahována textura zaznamenaných bodů.

## 5.2 Stereoskopie s otáčejícím se objektem

Další navrženou metodou je stereoskopie, která uvažuje stejně jako předchozí metoda otáčející se objekt v laboratorních podmínkách. Vstupními parametry je sada hodnot získaných kalibrací kamery a pořízené snímky, včetně snímku s nasvícenou osou rotace. Navržený algoritmus převede odfiltrované snímky do rektifikovaného tvaru a prochází každý snímek po řádcích. Body, jejichž původem je nasvícený vzor a mají společnou souřadnici  $v$  jsou považovány za korespondující body. Z nich se následně získá souřadnice  $v$  v prostoru pomocí rovnic 2.9 a 3.3. Opět se nejprve vyhodnotí osa rotace a následně jsou rekonstruované body v prostoru vztažené vzhledem k této souřadnici. Pokud jsou navíc k dispozici snímky zachycující objekt bez nasvíceného vzoru je ke každému bodu přiřazena barevná informace získaná převedením snímků do rektifikovaného tvaru a rozdělením snímků na RGB složky. V rektifikovaném tvaru odpovídají souřadnice korespondujících bodů ze snímků s nasvíceným vzorem souřadnicím, kde se nachází barevná informace odpovídajícího bodu. Každému rekonstruovanému bodu se tak přiřadí barevná informace. K zajištění textury stačí při vhodném nasvícení objektu pouze snímky zachycené z jednoho pohledu.

## 5.3 Stereoskopie s objektem na pevně

Poslední navržený algoritmus pro prostorovou rekonstrukci uvažuje na rozdíl od předchozích venkovní prostředí a pohybující se měřicí systém zaznamenávající nehybný objekt popsaný v kapitole 4.3.2. Vstupními parametry jsou sady snímků každého pohledu a souřadnice počátku přiloženého vzoru definujícího známé body, aby bylo možné určit pozici kamer vůči ostatním dvojicím. První ze snímků zachycuje vzor se známými body a objekt bez nasvíceného vzoru. Tento snímek tak neslouží pouze k určení pozice kamer, ale zachycuje i barevnou informaci o objektu. V případě, kdy

známý vzor zastíní snímáný objekt je pořízen snímek k zajištění barevné informace zvlášť. Zbylé snímky zachycují měřený objekt s měnící se pozicí nasvíceného vzoru. Pro každou sadu snímků je vyhodnocena pozice kamer vztažená ke známým bodům. Ze známých souřadnic na snímku odpovídajících prostorovým souřadnicím se určí matice kamer. Následně se získá fundamentální matice, která slouží k určení korespondujících bodů. K výpočtu fundamentální matice poslouží body získané detekcí známého vzoru. Protože se jedná o body, u kterých je jisté, že jsou korespondující je k výpočtu uplatněn *Eight-point algorithm*.

Na odfiltrovaných snímcích jsou detekovány veškeré body jejichž původem je nasvícený vzor. Tyto body jsou považovány za kandidáty na korespondující body. K určení odpovídajících dvojic slouží epipolární omezení. Ve skutečnosti není epipolární omezení (vztah 2.10) rovno nule. Dvojice bodů je brána jako korespondující při hodnotě blízké k nule splňující předem definovanou toleranci epipolárního omezení. Aby nebylo nutné procházet každý bod prvního pohledu s každým bodem druhého pohledu se vyhodnocuje pouze určitý počet bodů, které byly zaznamenány v podobném pořadí. Je tak definován parametr odsazení, který určí interval vyhodnocovaných bodů na druhém snímku. Například pro odsazení rovné pěti budou pro desátý detekovaný bod na prvním snímku uvažovány jako potenciální korespondující body ty, které byly zaznamenány jako páté až patnácté. Každý výběr bodů je následně podroben otestování epipolárním omezením, ze kterého je vybrána nejsilnější dvojice, aby bylo zajištěno unikátní omezení. Pokud dvojice splňuje epipolární omezení je brána za korespondující. V případě, kdy není část nasvíceného vzoru viditelná z jednoho z pohledů kamer budou korespondující body od sebe více vzdáleny a je nutné zvýšit odsazení. Pokud se tak nestane nebudou pouze detekovány. K chybnému vyhodnocení nedojde, protože by chybné dvojice nevyhovovaly epipolárnímu omezení.

Pokud došlo k chybné detekci a výsledné body jsou zašuměné je možné aplikovat robustní algoritmy RANSAC, nebo MLESAC. Metody v tomto případě neslouží k výpočtu fundamentální matice, ale k odfiltrování chybně detekovaných korespondujících bodů. Vzhledem k charakteru algoritmů se mohou výsledky při každém spuštění lišit.

Body v prostoru jsou následně pro každý pohled vyhodnoceny pomocí algoritmu DLT, který je určí z matic kamer a korespondujících bodů.

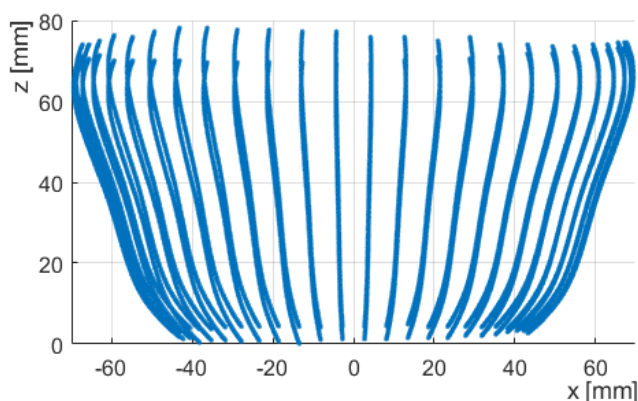
## 5.4 Korekční algoritmy

Protože nejsou přístroje, kterými jsou zaznamenány měřené objekty ideální a mají určitá omezení se mohou vyskytnout případy, kdy zrekonstruované body neodpovídají realitě. Stejně tak není vždy povrch objektu a prostředí ideální pro rekonstrukci. Pro vypořádání se s těmito problémy byla navržena řada korekčních algoritmů.

Navržené metody slouží ke korekci přesahů vzniklých u plochých objektů. Další metoda slouží ke korekci osy rotace při znalosti, že je objekt rotační.

### 5.4.1 Korekce přesahů

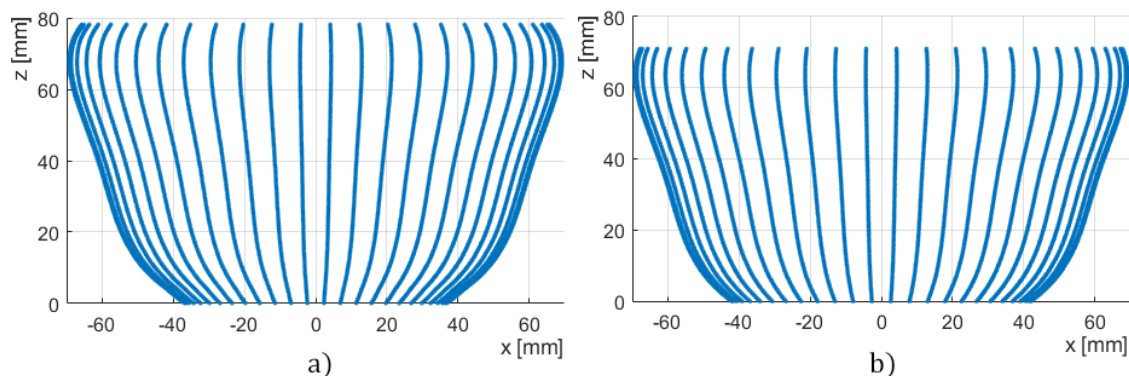
Možným problémem při rekonstrukci objektů je rozdílná minimální a maximální hodnota souřadnice  $z$  rekonstruovaných bodů pro různé nasvícené vzory, přesto že má objekt plochou vrchní část i podstavu. Při vhodném proložení pomocí křivek je možné tyto rozdíly srovnat na určitou hodnotu. Korekce se od sebe navzájem liší podle vztahu přesahů a rekonstruovaného objektu. Pokud jde o případ, kdy nebyly zrekonstruovány celé nasvícené vzory, lze využít metody minimálních a maximálních hodnot. V případě, kdy jsou zrekonstruovány přesahy vlivem rekonstrukce bodů, které neodpovídají objektu je vhodná korekce pomocí průměrování.



Obr. 5.1 Přesahy vzniklé při rekonstrukci

#### 5.4.1.1 Korekce pomocí minimálních a maximálních hodnot

Pokud se nepodaří zrekonstruovat celý nasvícený vzor na všech snímcích, dá se zpětně získat korekci. Stačí aby měl jeden zrekonstruovaný vzor s nejvyšší, případně nejnižší souřadnicí  $z$  hodnotu shodnou s měřeným objektem. Tyto dvě hodnoty lze brát jako rozsah hodnot pro proložení křivkou ostatních zrekonstruovaných bodů. Vhodnou volbou křivky je tak docíleno korekce tvarů.



Obr. 5.2 Korekce přesahů a) pomocí minimálních a maximálních hodnot b) průměrováním.



#### 5.4.1.2 Korekce průměrováním

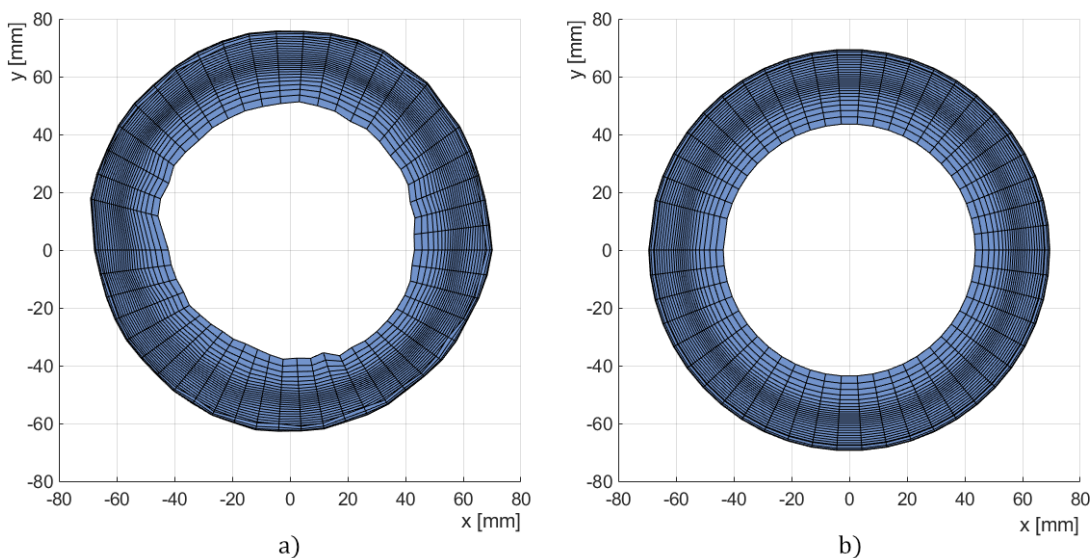
Při použití předchozí metody v případě, kdy má většina hodnot správnou souřadnici bude celý model rozšířen o přesahy. V tomto případě je žádoucí použití metody průměrování, kdy se vypočítá průměr nejvyšších, případně nejnižších hodnot definující počáteční a konečný bod křivek.

#### 5.4.2 Korekce polohy osy rotace

Vlivem nepřesného umístění objektu na střed rotující platformy mohou vzniknout nepřesnosti na výsledném modelu. Pokud je objekt rotační, je možné uplatnit jisté opatření, které napraví chybně určenou osu rotace. Řešením je korekce vzdáleností bodů od počátku při uvažování minimální a maximální vzdálenosti pro každou souřadnici  $z$  modelu. Výpočet korektní vzdálenosti od počátku je dán následujícím vztahem:

$$\rho_k = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{2}, \quad (5.1)$$

kde  $\rho_k$  je korektní vzdálenosti od počátku.  $\rho_{max}$  je maximální a  $\rho_{min}$  je minimální vzdálenost od počátku pro určitou souřadnici  $z$ .



Obr. 5.3 a) Chybně určená osa rotace b) korekce osy rotace

## 6 TESTOVÁNÍ METOD

Předchozí kapitoly byly zaměřeny na měřicí pracoviště a navržené metody prostorové rekonstrukce. K otestování navržených metod byla nasnímána sada snímků zachycujících testovací objekty a následně byla zhodnocena jejich kvalita.

Testování metod je rozděleno do dvou částí. V první se testují metody snímající otáčející se objekt. Uvažované metody jsou aktivní triangulace a stereoskopie. Metody jsou otestovány rekonstrukcí vázy a figurky. Ve druhé části je otestována metoda stereoskopie, která slouží k rekonstrukci neotáčejícího se objektu. Při jejím použití je vytvořen model kovadliny.

### 6.1 Testování metod snímajících otáčející se objekt

Metody prostorové rekonstrukce snímající otáčející se objekt, jsou otestovány na dvou objektech. Objekty byly voleny tak, aby na nich bylo možné zhodnotit navržené algoritmy. Prvním objektem je váza, při jejíž rekonstrukci jsou otestovány metody prostorové rekonstrukce na objektu, který nemá příliš složitý tvar. Objekt má ploché dno i vrchní část a je symetrický. Z toho důvodu je možné vyzkoušet korekční algoritmy. Modely vázy jsou reprezentovány pomocí čtyřúhelníků. Druhým testovacím objektem je figurka, která má složitější tvar než váza. Navržené algoritmy jsou vystaveny problémům s nenasvícenými částmi měřeného objektu. Na modelech je kromě metod prostorové rekonstrukce otestována aplikace textur na mračno bodů.

#### 6.1.1 Rekonstrukce vázy

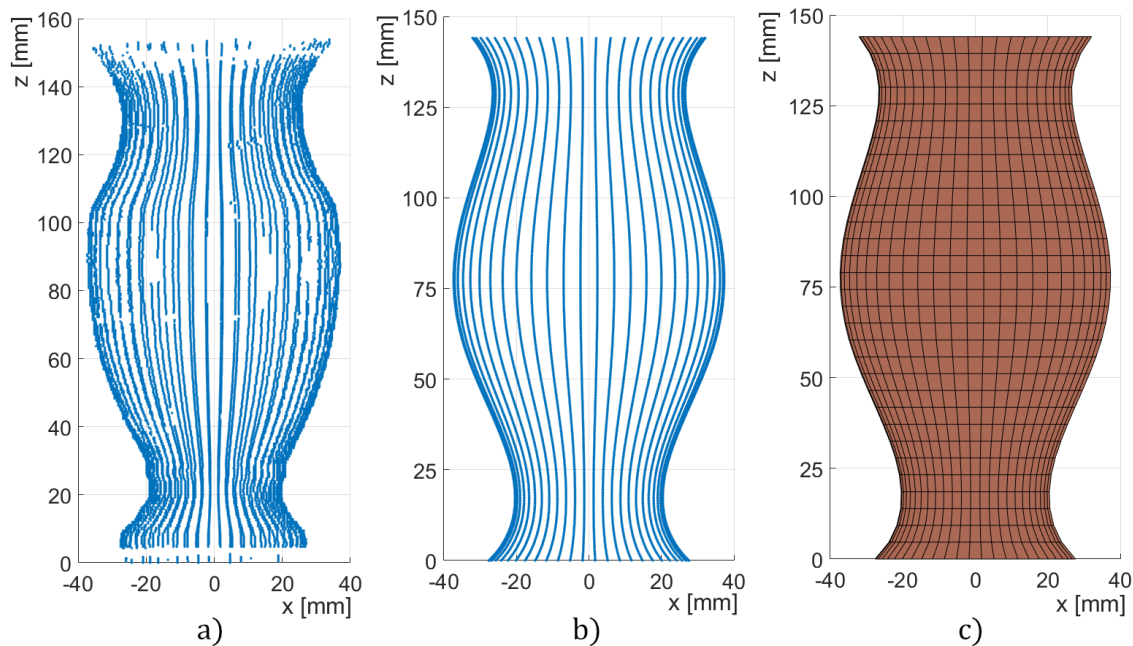
Jako první objekt pro otestování metod snímajících otáčející se objekt byla zvolena keramická váza (Obr. 6.1). Na výsledný model jsou kladeny požadavky, aby nejen zachytil geometrii měřeného objektu, ale zejména symetrii kolem osy  $z$ . Váza je z lesklého materiálu a má po obvodu namalovanou řadu vzorů. Zmíněný povrch není pro detekci laseru ideální, protože značně utlumuje nasvícený laserový vzor. Proto je nutné při filtraci okolí laseru snížit intenzitu filtru. Pokud by se tak neučinilo, byla by odfiltrována většina nasvíceného vzoru. Snížení intenzity filtru se může negativně projevit na kvalitě výsledného modelu, protože nemusí být odfiltrovány paprsky, které zachytilo okolí na zaznamenaných snímcích. Proto by se intenzita filtru neměla snížit více, než je nutné. Pro otestování obou metod bylo pořízeno 50 snímků, to odpovídá kroku natočení o  $7,2^\circ$ . Zvolený počet snímků je dostatečný pro zachycení celkové geometrie objektu. K proložení rekonstruovaných bodů byla zvolena polynomiální křivka čtvrtého řádu. Z křivek byly následně vytvořeny modely vázy. Plocha modelů je tvořena čtyřúhelníkovou reprezentací. K porovnání rozměrů modelu vázy s reálným objektem byla změřena její výška a průměr její nejvyšší a nejnižší části.



Obr. 6.1 Váza

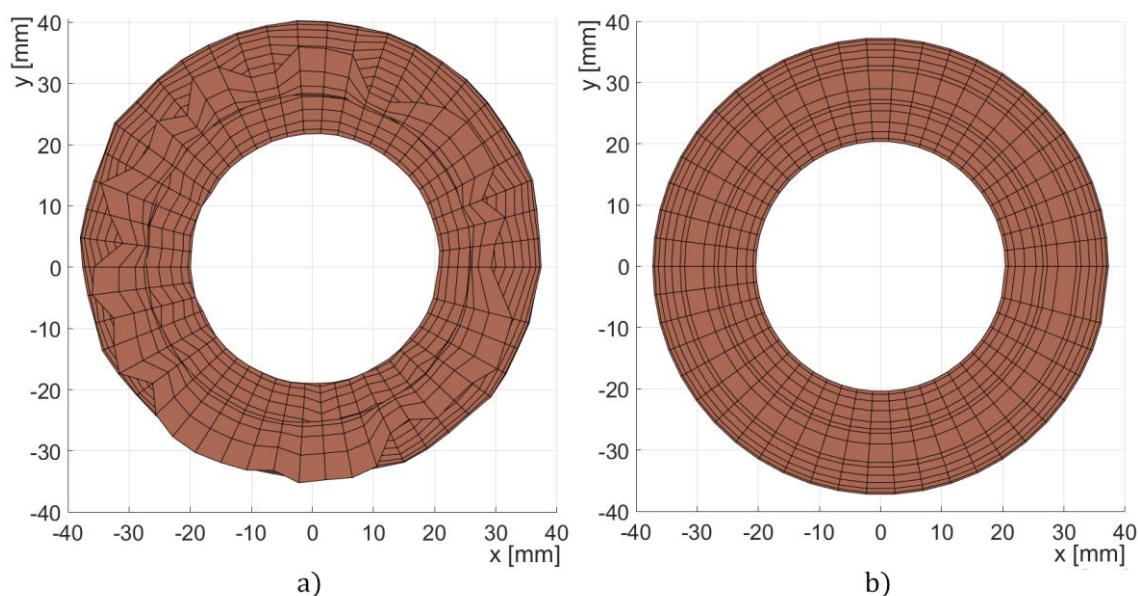
#### 6.1.1.1 Rekonstrukce vázy pomocí aktivní triangulace

Metodou aktivní triangulace bylo zaznamenáno 16 899 bodů v prostoru při intenzitě filtru k odstínění okolí snímaného objektu 10 %. Při nižších hodnotách filtru se objevují nepřesnosti vzniklé chybným vyhodnocením problémové části objektu tvořenou namalovanými vzory. Naopak při vysoké intenzitě filtru značně ubývá počet zaznamenaných bodů na objektu. Při pohledu na body v prostoru získané rekonstrukcí (Obr. 6.2a) je možné si všimnout jistých přesahů na vrchní a spodní straně vázy.



Obr. 6.2 Rekonstrukce vázy pomocí aktivní triangulace a) získané body b) křivky c) pohled na model vázy zepředu

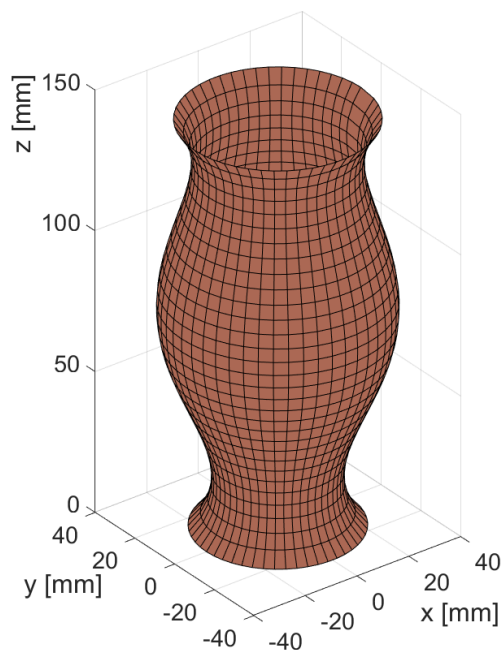
Přesahy neodpovídají geometrii vázy a mohou být způsobeny naskenováním vzoru promítnutého na její protější stranu. Vrchní i spodní část vázy je plochá, proto je možné uplatnění korekce při prokládání křivek (Obr. 6.2b), v tomto případě je vhodné použít metodu průměrování. Křivky byly následně použity ke generování čtyřúhelníkové plochy (Obr. 6.2c).



Obr. 6.3 Pohled shora na model vázy získaný metodou aktivní triangulace a) bez korekce osy rotace b) s korekcí osy rotace

Při pohledu na model ze shora (Obr. 6.3a) je viditelná mírná nesymetrie, která je způsobena nepřesným umístěním objektu na střed rotující platformy. Z toho důvodu byl aplikován algoritmus pro korekci polohy osy rotace. K zhodnocení funkčnosti korekčního algoritmu je vypovídající porovnání pohledu na model shora bez použití korekce (Obr. 6.3) a pohled shora s použitou korekcí (Obr. 6.3b). Ze zmíněných pohledů je viditelná úplná eliminace nesymetrií modelu kolem souřadné osy  $z$ .

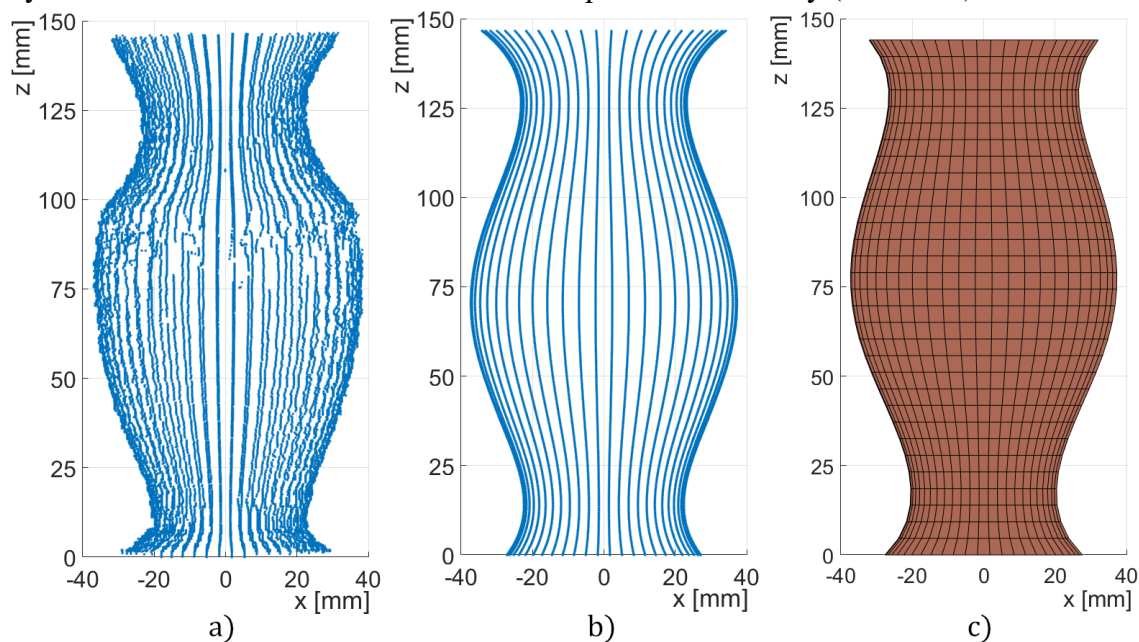
Výsledný model získaný uplatněním metody aktivní triangulace (Obr. 6.4) odpovídá geometrii měřené vázy. Výška objektu je 145,0 mm, přičemž výška modelu je 144,0 mm, v procentech je odchylka rovna 0,7 %. Průměr nejvyšší a nejnižší části objektu je 65,0 mm a 54,0 mm, zatímco průměr těchto částí výsledného modelu nabývá hodnot 66,4 mm a 57,4 mm. V procentech to odpovídá 1,5 % a 2,2 %. Odchyly mohou být způsobeny citlivostí metody na přesnost triangulačního úhlu, který byl určen s přesností na jednotky stupně a přesností použitých komponent.



Obr. 6.4 Model vázy získaný metodou aktivní triangulace

#### 6.1.1.2 Rekonstrukce vázy pomocí stereoskopie

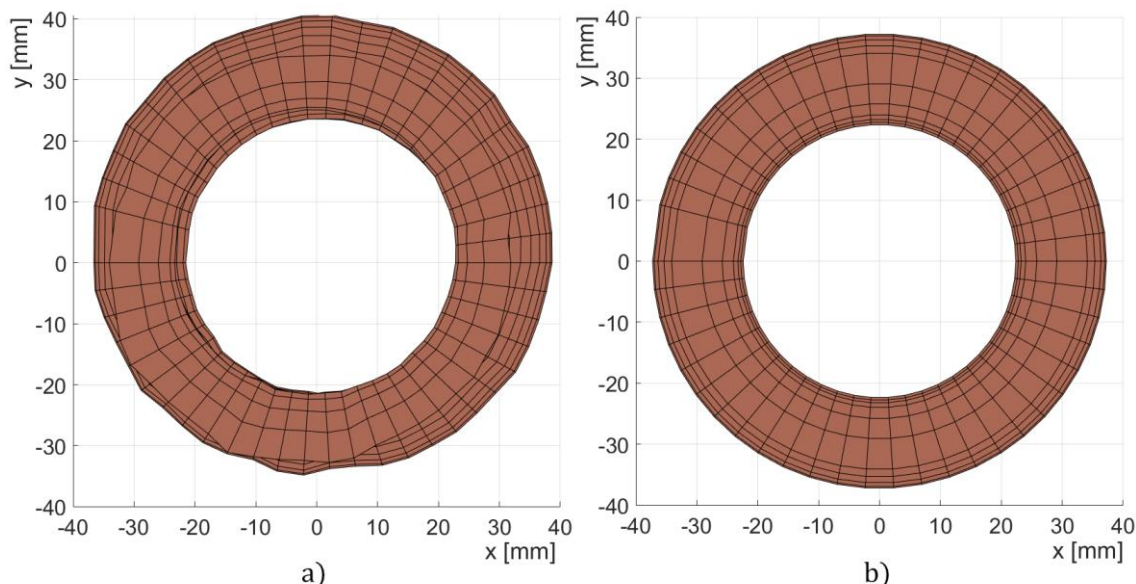
Při rekonstrukci vázy pomocí stereoskopie bylo zaznamenáno 17 960 bodů v prostoru (Obr. 6.4a) při intenzitě filtru 10 %. Většina získaných bodů je z povrchu vázy, na kterém nejsou barevné vzory. Problémová část tvořená černými vzory byla zaznamenána nepřesně s odchylkami, případně nebyla zaznamenána vůbec. Omezení filtru v tomto případě propustilo řadu nepřesností. Chyba způsobená vybočujícími body byla částečně eliminována vhodnou volbou aproximační křivky (Obr. 6.5b).



Obr. 6.5 Rekonstrukce vázy pomocí stereoskopie a) získané body b) křivky c) pohled na model vázy zepředu



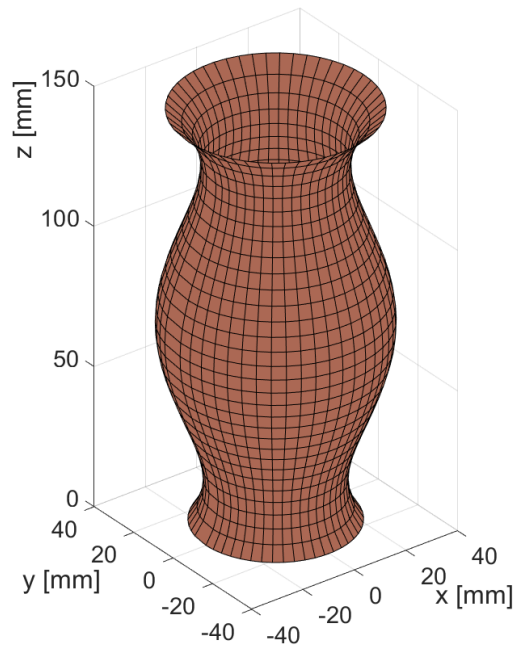
Stejně jako v předchozím případě, nebyla zachována symetrie objektu a byly zaznamenány jisté přesahy. Z toho důvodu byly použity korekční algoritmy, nicméně v tomto případě bylo vhodné uplatnit pro korekci přesahů metodu minimálních a maximálních hodnot, protože vzniklé přesahy nejsou natolik výrazné, jako v předchozím případě. Korekce přesahů je viditelná na obrázcích Obr. 6.5a Obr. 6.5c.



Obr. 6.6 Pohled shora na model vázy získaný metodou stereoskopie a) bez korekce osy rotace b) s korekcí osy rotace

Pro zhodnocení korekce chybně určené osy rotace poslouží pohled na model vázy shora před (Obr. 6.6a) a po (Obr. 6.6b) aplikaci korekce. Model je po uplatnění korekčního algoritmu symetrický.

Výsledný model (Obr. 6.7) odpovídá geometrii snímaného objektu. Pro stanovení jeho přesnosti z hlediska rozměrů budou porovnány stejné parametry jako v předchozím případě. Výška modelu je 146,6 mm, což při výšce vázy 145,0 mm odpovídá chybě 1,1 %. Průměr nejvyšší a nejnižší části objektu je 65,0 mm a 54,0 mm. Model v těchto oblastech dosahuje hodnot 67,5 mm a 53,8 mm. Zmíněné nepřesnosti vyjádřené v procentech odpovídají 3,8 % a 0,4 %. Původem odchylek mohou být kromě kvality použitých komponent, nepřesnosti vzniklé při kalibraci kamer.



Obr. 6.7 Model vázy získaný metodou stereoskopie

### 6.1.2 Rekonstrukce figurky

Druhý objekt pro otestování metod prostorové rekonstrukce snímajících otáčející se objekt je figurka (Obr. 6.8). Jedná se o objekt se složitější geometrií oproti předchozímu, zejména kvůli vyskytujícím se tvarům, které zastíní laserový paprsek a část geometrie tak není možné zaznamenat. Z toho důvodu je nutné učinit jistá opatření. První z nich je zkrácení báze, aby byl v případě aktivní triangulace nasvícený vzor viditelný z pohledu kamery a v případě stereoskopie viditelný z obou pohledů kamer. Dalším opatřením je množství pořízených snímků. Pro tento objekt bylo využito maximálního rozlišení motoru, a tak bylo pořízeno 200 snímků s rozdílným natočením objektu. Figurka má různě zbarvené části, z toho důvodu je vhodná i pro otestování aplikace barevné textury. Pro zajištění barevné informace bylo pořízeno dalších 200 snímků otáčejícího se objektu, nicméně tentokrát bez nasvíceného vzoru. Problémovou částí na figurce jsou boty, jejichž barva je tmavě šedá. Vzhledem k tomu, že problémová část nebyla zaznamenána ani při opakovaném měření a snížení intenzity filtru byly boty pro zlepšení detekce natřeny smývatelnou bílou barvou. Výsledné modely budou reprezentovány mračnem bodů, protože generování mnohoúhelníkové plochy je u takto složitého objektu problémové.



Obr. 6.8 Figurka

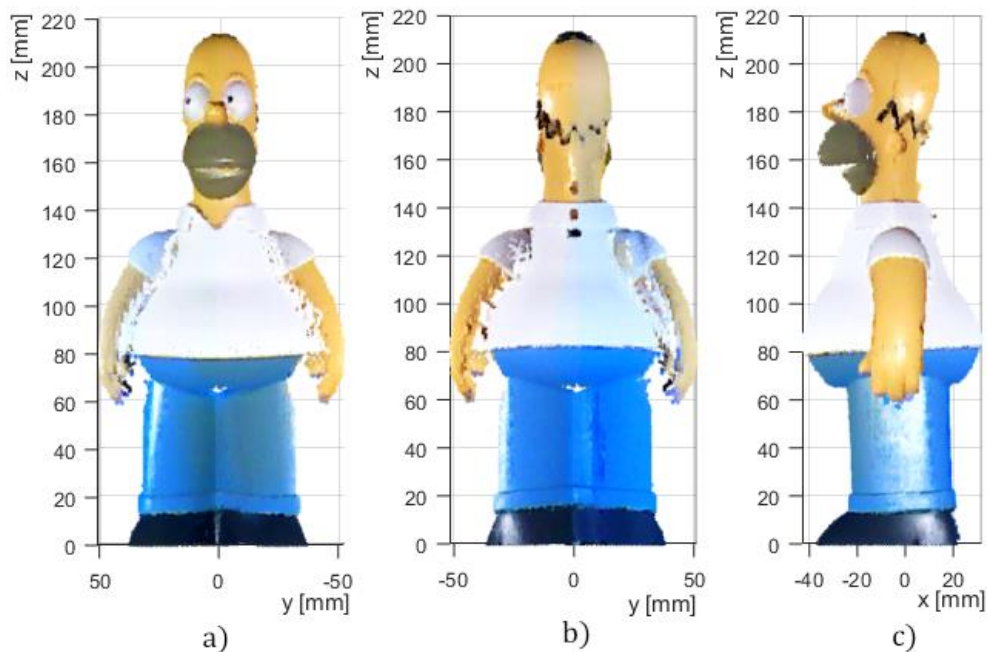
Při rekonstrukci figurky byl zjištěn nedostatek metod snímajících otáčející se objekt. Nelze zaznamenat například vnitřní část rukou, protože není viditelná na snímcích kamer ani při otáčení objektu. Další problém nastává při snaze nastavit zorné pole kamer tak, aby snímala celý nasvícený vzor. Při pohybu, aby byla viditelná zakrytá část vzoru se zastíní jiná část. Na výsledném modelu tak vznikají prázdná místa, protože nebyl zachycen celý nasvícený vzor. Při použití metod, kdy se mění pozice měřicího systému by bylo možné se na zastíněné části vlastní geometrií objektu více zaměřit. Mohou tak nastat případy, kdy i v laboratorních podmínkách je vhodné použití metod s pohybujícím se měřicím systémem, případně jejich kombinace vzhledem k vyšší přesnosti metody snímající otáčející se objekt. Pro zhodnocení přesnosti rozměrů modelu byla změřena výška figurky a průměr její nejširší části.

#### **6.1.2.1 Rekonstrukce figurky pomocí aktivní triangulace**

Při rekonstrukci figurky pomocí aktivní triangulace bylo zaznamenáno 96 265 bodů v prostoru při intenzitě filtru 40 %. Při větším snížení intenzity filtru se na výsledném modelu projevuje šum. Hlavním problémem při rekonstrukci bylo nastavení zorného pole kamery, aby zaznamenala celý nasvícený vzor. Kamera byla umístěna tak, aby se co nejvíce minimalizovala prázdná místa vzniklá zastíněním nasvíceného vzoru. Přesto jsou na modelu oblasti kam nasvícený vzor nepronikl ani při jednom natočení objektu. Prázdná místa vzniklá nezaznamenáním celého vzoru kamerou jsou viditelná z pohledu na model zepředu (Obr. 6.9a) a pohledu zezadu (Obr. 6.9b). Na zmíněných pohledech jsou vidět prázdná místa vzniklá zastíněním laserového vzoru rukou figurky. Vyplnění prázdných oblastí je možné docílit proložením bodů křivkami. Prokládací algoritmus musí být dostatečně robustní, aby nespojil ruce modelu, které mají být volně, se

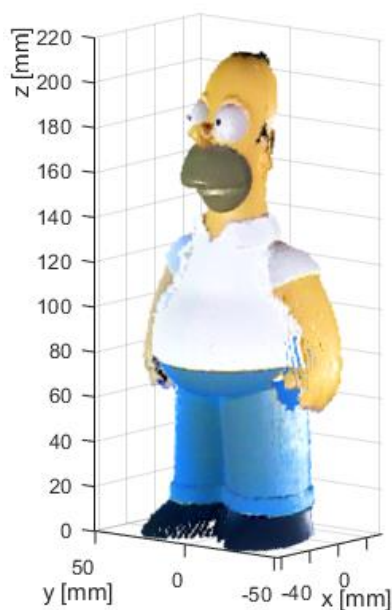


zbytkem objektu. Dalším řešením je použití nástrojů pro vyplnění povrchu modelu v modelovacích programech, nebo programech pro zpracování 3D povrchu.



Obr. 6.9 Pohled na model figurky získaný metodou aktivní triangulace a) zepředu b) zezadu c) zprava

Model figurky sloužil k otestování aplikace textur na mračno bodů. Při pohledu na model zprava (Obr. 6.9c) je na hlavě figurky viditelný odraz od nasvícení. Při pohledu zezadu (Obr. 6.9b) si lze povšimnout nerovnoměrného zbarvení hlavy figurky. Přesto aplikovaná textura extrahovaná ze snímků plní svůj účel a výsledný model (Obr. 6.10) vypadá reálněji.

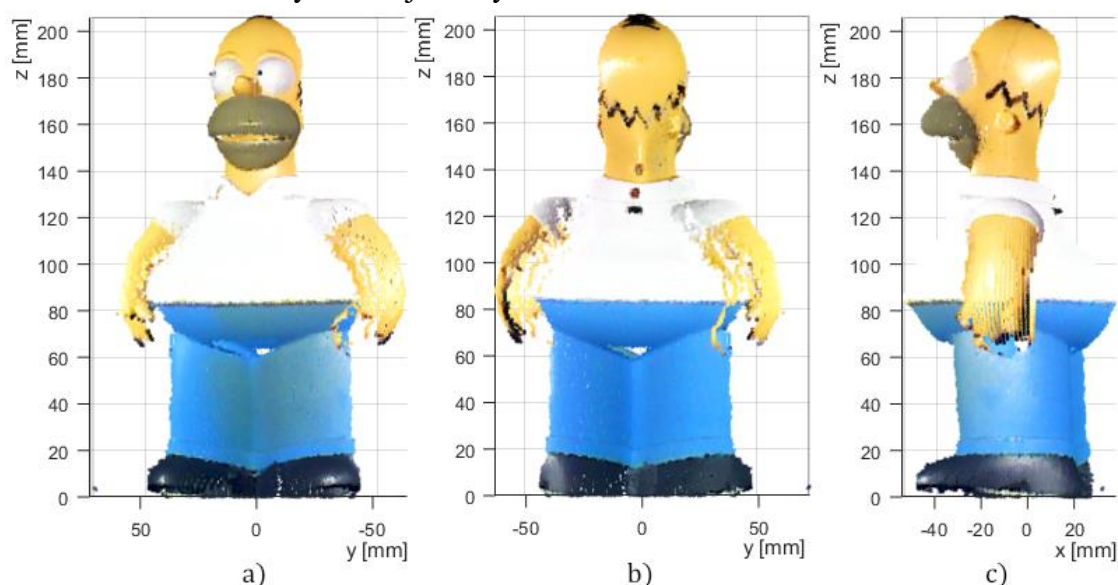


Obr. 6.10 Model figurky získaný metodou aktivní triangulace

Výška objektu je 215,0 mm, zatímco výška modelu je 212,5 mm. Průměr nejširší části figurky je 75,0 mm, model v této části nabývá 74,2 mm. Při vyjádření chyb v procentech to odpovídá 1,2 % a 1,1 %. Velikost chyb řádově odpovídá chybám zjištěným při rekonstrukci předchozího objektu.

### 6.1.2.2 Rekonstrukce figurky pomocí stereoskopie

Figurka sloužila i pro otestování metody stereoskopie. Při jejím použití bylo zaznamenáno 106 082 bodů v prostoru při intenzitě filtru 20 %. V tomto případě znovu nastal problém se zaznamenáním celého vzoru a ke zhodnocení bude vypovídající pohled na model zepředu (Obr. 6.11a), zezadu (Obr. 6.11b) a zprava (Obr. 6.11c). Na zmíněných pohledech je viditelná, stejně jako v případě metody aktivní triangulace, absence nedetekovatelných oblastí. Byl tak znovu prokázán nedostatek metod snímajících otáčející se objekt, kdy v případě obou metod nebyly detekovány zastíněné oblasti. Vhodnou volbou uspořádání optického systému se podařilo tyto nedostatky minimalizovat a modely dosahují dobrých kvalit.

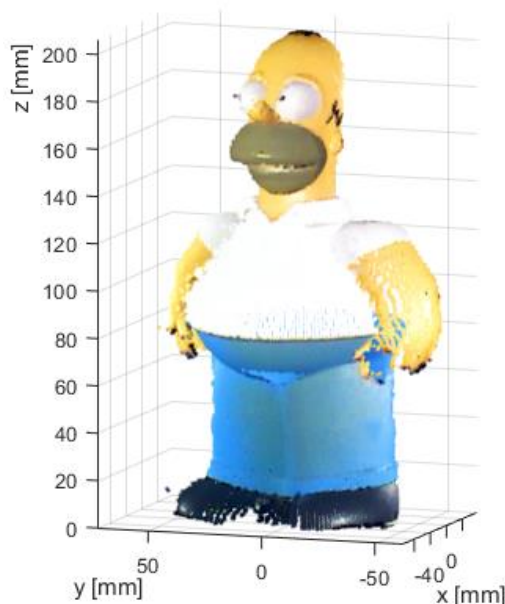


Obr. 6.11 Pohled na model figurky získaný pomocí stereoskopie a) zepředu b) zezadu c) zprava

Pro zajištění barevné informace byly použity snímky zaznamenané z jednoho z pohledů. Byla zvolena kamera, jejíž snímky jsou kvalitnější. Textura aplikovaná na model odpovídá zbarvení figurky. Jedinou nepřesností je bílý pruh na zadní části hlavy modelu. Jeho původem je odraz světla, které sloužilo k nasvícení objektu.

Výška modelu je 206,0 mm, to při výšce objektu rovné 215,0 mm odpovídá chybě 4,2 %. Průměr nejširší části figurky je 75,0 mm, zatímco hodnota modelu je rovna 73,7 mm. Při vyjádření v procentech odchylka odpovídá 1,8 %. Model figurky působí mírně širším dojmem oproti rekonstruovanému objektu. Důvodem je vyšší odchylka od výšky objektu vůči odchylce od šířky. Přesto výsledný model (Obr. 6.12) dosahuje dobrých

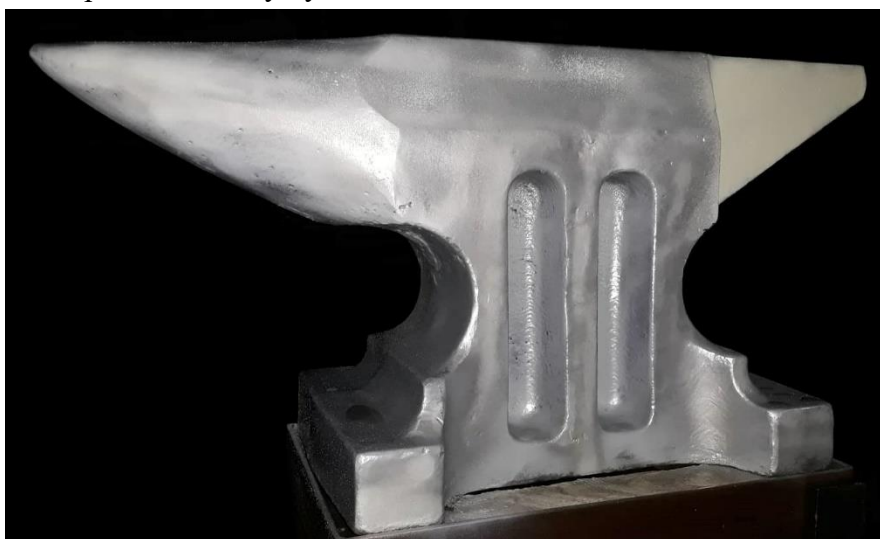
kvalit. Při rekonstrukci byla úspěšně otestována aplikace textur a metoda stereoskopie na objektu, který má složitou geometrii.



Obr. 6.12 Model figurky získaný metodou stereoskopie

## 6.2 Testování metody stereoskopie snímající nehybný objekt

Pro otestování navržené metody pro snímání nehybného objektu byla zvolena kovadlina (Obr. 6.13). Vzhledem k její váze je obtížné ji umístit do laboratoře. Pokud by byla použita rotující platforma, kterou je vybaveno současné laboratorní pracoviště, by došlo ke zničení otočného stolku a motoru. Rotující platforma by musela být větší a odolnější. Tvar kovadliny je vhodný pro otestování metod prostorové rekonstrukce, protože má hranaté i zaoblené části, na které je možné se zaměřit při hodnocení výsledného modelu. Povrch kovadliny má barvu vhodnou pro detekci laserového vzoru. To je při venkovním měření žádoucí především, aby bylo možné odfiltrout okolní rušení.



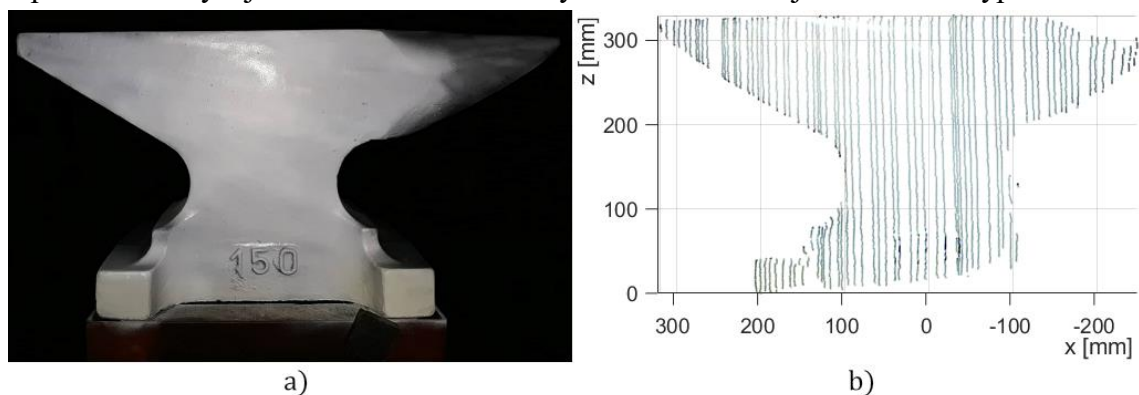
Obr. 6.13 Kovadlina

K předejití rušení ve formě dopadajících slunečních paprsků měření proběhlo v noci za snížených světelných podmínek. Přesto se nedalo vyhnout rušení v podobě odrazu záření pouliční lampy od lesklých objektů v okolí kovadliny. Aby byly zaznamenány snímky, ze kterých je možné zrekonstruovat celkový prostorový model, byly pořízeny sady snímků z osmi pozic. Při každé změně pozice byl jako první pořízen snímek se známým vzorem pro určení pozice kamer. Každý vzor představoval souřadnice vrcholu podstavce, na které je objekt posazen. Protože známý vzor zakryl viditelnou část objektu z pozic kamer, byl navíc pořízen snímek samotného objektu pro zajištění barevné informace. Následně byly pořízeny snímky zachycující kovadlinu s pohyblivým se nasvíceným laserovým vzorem. Při pořizování snímků byl kladen větší důraz na nasvícení částí, kde dochází ke změnám geometrie objektu. Celkem bylo pořízeno 516 snímků a vyhodnoceno 65 364 bodů v prostoru. Pořízené snímky zachycují geometrii po bocích objektu, vrchní část nebyla zaznamenána, protože má tmavou barvu, na které nelze detekovat nasvícený laserový vzor. Bylo by nutné tuto část obarvit, stejně jako při rekonstrukci figurky v kapitole 6.1.2.

### 6.2.1 Zhodnocení dílčích pohledů

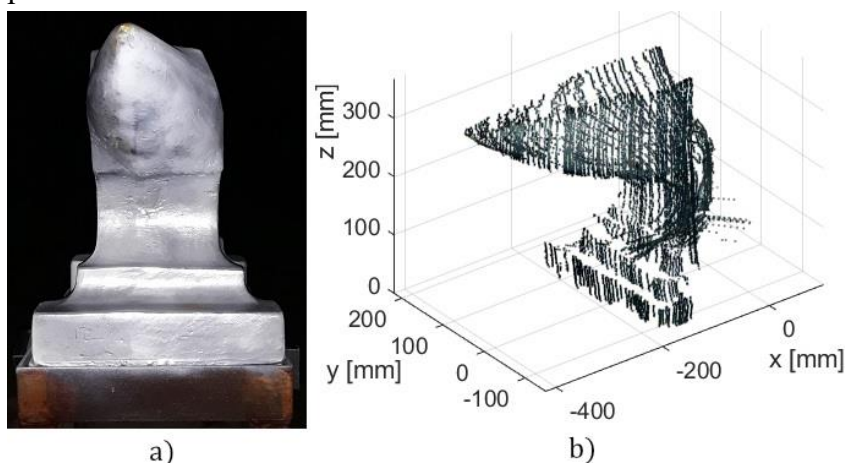
Při rekonstrukci kovadliny byly pořízeny snímky z osmi pozic. Čtyři pozice zachycující boční strany objektu a čtyři pozice zachycující rohové části pro zajištění návaznosti bočních pohledů. Pro dostatečné zhodnocení použité metody a získaného modelu bude postupně popsán každý ze čtyř bočních pohledů na model.

První sada snímků byla pořízena z pohledu na kovadlinu zepředu (Obr. 6.14a). Hlavními požadavky na zachycené body je dodržení ploché části a zachycení tvarů. Pohled zepředu (Obr. 6.14b) na získané body v prostoru odpovídá tvaru kovadliny. Kuželovitý tvar v pravé části kovadliny se nepodařilo přesně zachytit. Odchylna může být způsobena zbarvením části objektu, na kterém je obtížná detekce laserového vzoru. Nezaznamenaná oblast se nachází v místech, které jsou rekonstruovány jedním z pohledů zachycujících rohové části. Ve výsledném modelu je tato oblast vyplněna.



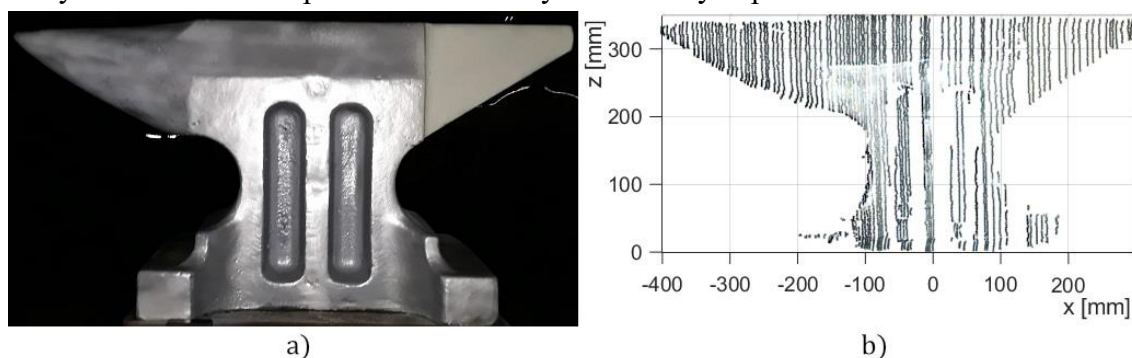
Obr. 6.14 a) Pohled na kovadlinu zepředu b) zrekonstruované body

Následně byla změněna pozice kamer, aby byl objekt zaznamenán i z pohledu zprava (Obr. 6.15a). Obtížnou oblastí k zaznamenání je vystupující část jehlovitého tvaru. Aby došlo ke správnému zachycení zmíněné části byla oblast zaznamenána ze tří pozic. Jehlovitý tvar se tak podařilo zrekonstruovat. Při pohledu na zachycené body (Obr. 6.15b) jsou viditelné přesahy, jejichž pozice je uvnitř kovadliny. Na výsledném modelu nebudou tyto nepřesnosti viditelné, protože budou zakryty body získanými z ostatních pohledů.



Obr. 6.15 a) Pohled na kovadlinu zprava b) zrekonstruované body pohledu na kovadlinu zprava

Třetí sada snímků byla pořízena z pohledu na kovadlinu zezadu (Obr. 6.16a). Objekt obsahuje v této části měnící se tvary a dvojici vzorů prohlubujících povrch kovadliny. Zaznamenané body (Obr. 6.16b) odpovídají tvaru kovadliny. Změna hloubky povrchu dvojice vzorů nebyla plně zaznamenána. Důvodem je dlouhý rozměr báze, který za cenu menšího počtu zaznamenaných bodů zvýšil přesnost modelu.

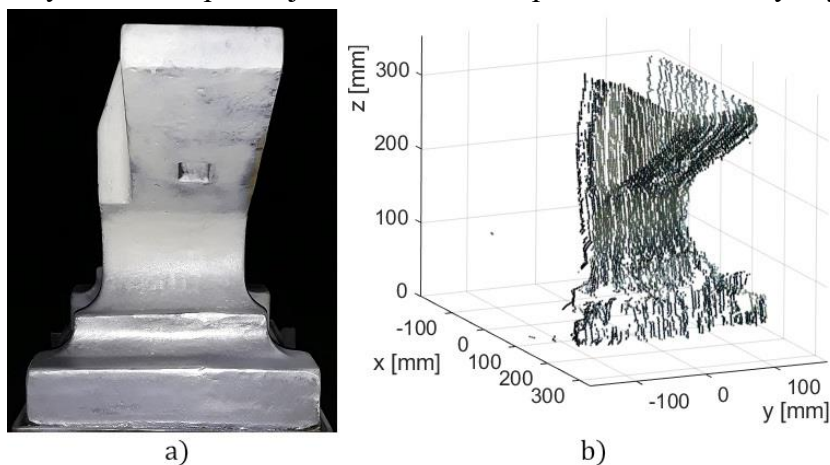


Obr. 6.16 a) Pohled na kovadlinu zezadu b) zrekonstruované body

Poslední sada snímků zachycuje pohled na kovadlinu zleva. Při pořizování snímku k rekonstrukci této oblasti byly zaznamenány snímky ze tří pozic. Levá část kovadliny (Obr. 6.17a) obsahuje hluboký výřez. Z toho důvodu byla jedna pozice kamer přizpůsobena tak, aby zachytila tuto oblast. Další pozice kamer byla přizpůsobena, aby zachytila přímý pohled na pohled na kovadlinu zleva. Poslední pozice sloužila



k zajištění návaznosti na pohled zepředu. Na obrázku Obr. 6.17b je viditelný tvar rekonstruovaných bodů odpovídající tvarům levého pohledu na snímáný objekt.

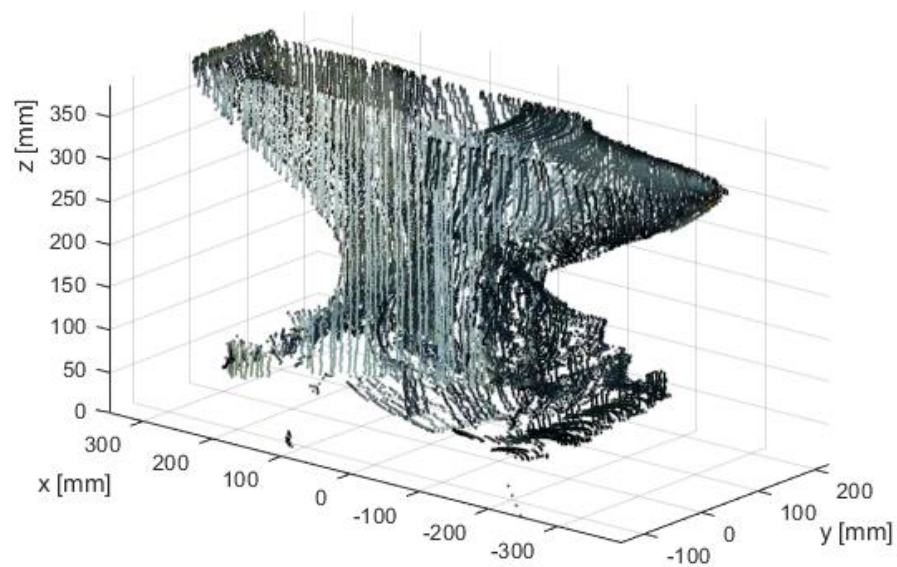


Obr. 6.17 a) Pohled na kovadlinu zleva b) zrekonstruované body

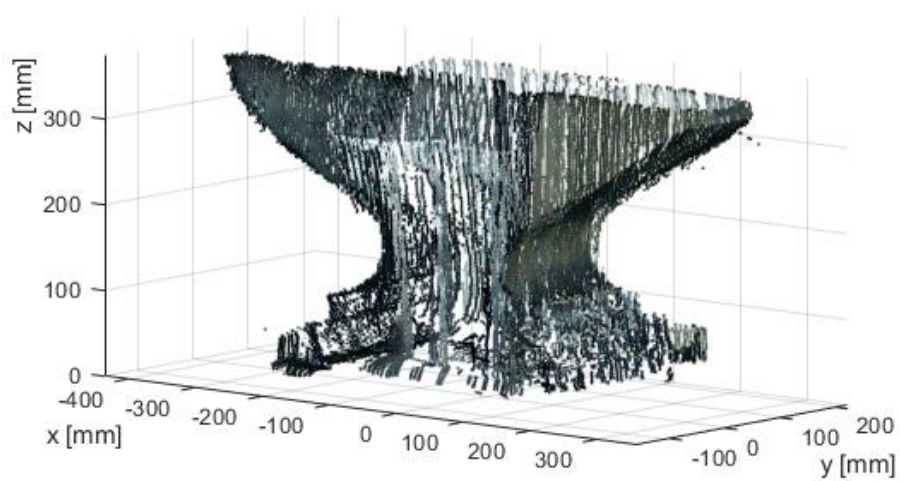
## 6.2.2 Výsledný model

Veškeré zaznamenané pohledy byly následně spojeny, aby společně tvořily výsledný model. Určení vzájemné pozice rekonstruovaných pohledů bylo možné díky zaznamenanému známému vzoru určujícímu souřadnice v prostoru. Body získané z dílčích pohledů na sebe, až na drobné přesahy, navazují (Obr. 6.18 a Obr. 6.19). Při pořizování snímků zachycujících barevnou informaci o objektu se nepodařilo snímáný objekt vhodně nasvítit. Z toho důvodu je textura místy zbarvena do černa. Vzhledem k obtížnosti metody a zhoršených podmínkách nedosahuje výsledný model kvalit modelů získaných pomocí navržených metod snímajících otáčející se objekt. Přesto se jedná o velmi dobrý výsledek, protože pomocí zmíněných metod by nebylo možné tento objekt zrekonstruovat.

Pro porovnání rozměrů modelu se skenovaným objektem byla změřena vzájemná vzdálenost vrcholů podstavy kovadliny a vzdálenost mezi vystupujícími částmi kovadliny. Rozměry podstavy objektu jsou 275×400 mm, zatímco model má v této oblasti rozměr 298×436 mm. Vyjádřeno v procentech to odpovídá 8,3 % a 9,0 %. Vzdálenost mezi vystupujícími částmi kovadliny v jejich nejvzdálenější části je 725 mm, u výsledného modelu je to 760 mm. V tomto případě je odchylka vyjádřená v procentech rovna 4,8 %. Odchyly jsou vyšší než u metod snímajících otáčející se objekt. Důvodem je, že pro zjištění vnějších parametrů sloužil pouze jeden známý vzor.



Obr. 6.18 Pohled na model kovadliny, ze kterého je viditelná přední a pravá část



Obr. 6.19 Pohled na model kovadliny, ze kterého je viditelná zadní a levá část

## 7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo nastudovat metody prostorové rekonstrukce objektu ze snímků zachycujících objekt nasvícený laserovým vzorem. Dále definovat požadavky na měřicí systém a následně realizovat vhodné pracoviště a metody prostorové rekonstrukce. Navržené metody otestovat rekonstrukcí objektů a následně zhodnotit jejich kvalitu.

Úvodní část práce se věnovala pravidlům geometrie, které jsou u metod prostorové rekonstrukce uplatňovány. Následně byla popsána epipolární geometrie, která definuje vzájemný vztah dvojice pohledů zaznamenávajících stejnou scénu.

Poté následovala kapitola zabývající se metodami prostorové rekonstrukce. Byly vysvětleny principy aktivní triangulace a stereovize. Byly uvedeny možné varianty použití, postup při použití metod a jejich výhody a nevýhody. Výstupem z metod prostorové rekonstrukce je mračno bodů, které může být dále zpracováno. Ve zbylé části kapitoly byly uvedeny možné způsoby vytvoření plochy modelu z mračna bodů. Způsoby aplikace textur, aby byl model reálnější a formáty sloužící k uchování prostorových modelů.

Následující kapitola byla věnována měřicímu pracovišti, které slouží k pořízení snímků potřebných k prostorové rekonstrukci. Byly diskutovány kladené požadavky na měřicí pracoviště v závislosti na vlastnostech snímaného objektu. Měřicí pracoviště se mění v závislosti na rozměrech a materiálu objektu. Poté byl uveden vliv rozložení optického systému na výsledek rekonstrukce. Ukázalo se, že rozměr báze a vzdálenost optického systému od snímaného objektu má vliv na přesnost a množství detekovatelných bodů. Závěrem kapitoly bylo prezentováno realizované měřicí pracoviště pro laboratorní a venkovní měření včetně popisu obsažených komponent.

Další kapitola sloužila k uvedení realizovaných metod. Pro laboratorní měření, při kterém se snímá otáčející se objekt, byly navrženy dva algoritmy. První z nich využívá principu aktivní triangulace a druhý stereoskopie při kalibrované dvojici kamer. Protože existují objekty, které není možné bezpečně přemístit do laboratoře, byl navržen algoritmus pro venkovní měření. Navržená metoda využívá znovu principu stereovize, nicméně tentokrát v případě, kdy se mění pozice kamer a jsou známy pouze jejich vnitřní parametry. Závěrem kapitoly jsou uvedeny navržené korekční algoritmy sloužící ke korekci přesahů a chybně určené osy rotace.

V poslední kapitole práce jsou otestovány realizované metody prostorové rekonstrukce na řadě objektů. První část sloužila k otestování metod snímajících otáčející se objekt. První objekt byla keramická váza, při které byla kromě metod prostorové rekonstrukce ověřena funkčnost korekčních algoritmů. Mračno bodů získané rekonstrukcí bylo proloženo křivkami a výsledné modely jsou reprezentovány pomocí čtyřúhelníků. Jako druhý objekt k otestování metod pro laboratorní měření byla zvolena figurka, která sloužila také k otestování aplikace textur. Během její rekonstrukce byl



dokázán nedostatek metod prostorové rekonstrukce snímajících otáčející se objekt, kdy není možné detekovat oblasti zastíněné vlastní geometrií. Nedostatky se podařilo minimalizovat vhodnou volbou uspořádání optického systému. Oba testovací objekty obsahovaly místa, která neměla ideální povrch pro detekci laserového vzoru. Bylo zjištěno, že v praxi nejsou vždy ideálně detekovatelné oblasti a je nutné tomu přizpůsobit postup při rekonstrukci. Výsledné modely vázy i figurky získané metodami aktivní triangulace a stereoskopie dosahují dobrých kvalit a mají, až na jisté odchylky, rozměry odpovídající skutečným objektům. Následně byla otestována metoda stereoskopie sloužící k rekonstrukci objektu, který se nehýbe. Jako testovací objekt posloužila kovadlina. Pro zajištění zaznamenání celé geometrie objektu byly zachyceny snímky z osmi pozic. Byl zhodnocen každý z bočních pohledů na model a byl uveden výsledný model. Výsledný model odpovídá geometrii kovadliny, byla tak úspěšně otestována navržená metoda pro rekonstrukci nehybného objektu ve venkovním prostředí.

Veškeré výsledné modely se vizuálně shodují s reálnými objekty, hlavní zásluhu mají zaznamenané tvary a použité textury. Možné využití modelů získaných pomocí navržených metod se liší podle způsobu, jakým jsou reprezentovány. Pro modely reprezentované mračnem bodů není vhodné využití v kinematografii a vývoji počítačových her, vzhledem k velkému množství bodů. Možným řešením je retopologie, kdy by se vytvořila mnohoúhelníková plocha kolem mračna bodů. Pro vytisknutí modelů na 3D tiskárně by byla reprezentace pomocí mračna bodů taktéž nevhodná. Bylo by nutné vygenerovat mnohoúhelníkové plochy a následně je uložit ve formátu podporovaném 3D tiskárnou. Ve většině případů se jedná o formát STL. Pro použití v medicíně a pro elektronické uchovávání památek je použití modelů reprezentovaných mračnem bodů možná.

Během případné budoucí práce by bylo možné se zaměřit na zvýšení přesnosti navržených metod prostorové rekonstrukce. Užitečná by byla kombinace metod pro laboratorní a venkovní měření, kdy by došlo k řešení problému metod snímajících otáčející se objekt s detekcí zastíněných částí a ke zvýšení přesnosti metody, při které se mění pozice optického systému. Zdokonalení algoritmu pro generování čtyřúhelníkové plochy, aby ho bylo možné aplikovat na modely se složitější geometrií. Možná zlepšení měřicího pracoviště by spočívala v pořízení kvalitnějších komponent. Při použití přesnějších kamer by výsledné modely dosahovaly vyšší přesnosti. S větší rotující platformou by bylo možné zaznamenat rozměrnější objekty a při zvýšení rozlišení rotující platformy by se dalo detekovat více bodů a modely by dosahovaly vyšších kvalit.

# Literatura

- [1] K. F. RILEY, M. P. HOBSON a S. J. BENICE, Mathematical methods for physics and engineering. 3rd ed, New York: Cambridge University Press, 2006.
- [2] J. ŽÁRA, B. BENEŠ, J. SOCHOR a P. FELKEL, Moderní počítačová grafika, 2. vydání editor, Brno: Computer Press, 2005.
- [3] M. ŠONKA, V. HLAVÁČ a R. BOYLE, Image processing, analysis, and machine vision. 4th edition, United States of America: Cengage Learning, 2015.
- [4] R. HARTLEY a A. ZISSERMAN, Multiple view geometry in computer vision, 2nd ed editor, New York: Cambridge University Press, 2003.
- [5] O. SCHREER, P. KAUFF a T. SIKORA, 3D videocommunication: algorithms, concepts, and real-time systems in human centred communication. Hoboken, Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [6] N. PEARS, Y. LIU a P. BUNTING, 3D imaging, analysis and applications, London: Springer, 2012.
- [7] D. FORSYTH a J. PONCE, Computer vision: a modern approach, London: Prentice Hall, 2003.
- [8] L. QUAN, Image-based modeling, New York: Springer, c2010.
- [9] B. CYGANER a J. P. SIEBERT, An introduction to 3D computer vision techniques and algorithms, Chichester, U.K.: J. Wiley, 2009.
- [10] D. HEARN a M. P. BAKER, Computer graphics, C version, 2nd ed. Upper Saddle River N.J.: Prentice Hall,, c1997.
- [11] A. GOSHTASBY, 2-D and 3-D image registration for medical, remote sensing, and industrial applications, Hoboken, NJ: J. Wiley, c2005.
- [12] R. HARTLEY, „In defense of the eight-point algorithm,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(6), 580-593. DOI: 10.1109/34.601246. ISSN 01628828. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/601246/>.

- [13] M. A. FISCHLER a R. C. BOLLES, „Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,“ *Communications of the ACM*, č. 24(6), 1981.
- [14] P. H. S. TORR a A. ZISSERMAN, „MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry,“ *Computer Vision and Image Understanding*, č. 68(1), 2000.
- [15] G. VOSSelman a H.-G. MAAS, Airborne and terrestrial laser scanning, Dunbeath: Whittles, c2010.
- [16] W. R. ASHOK, M. S. PANSE a H. APTE, „Laser triangulation based object height measurement,“ *INTERNATIONAL JOURNAL FOR RESEARCH IN EMERGING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, č. ISSN 2349-7610. 2349-7610, Mumbai, Maharashtra, India, 2015.
- [17] T. Y. CHUANG, F. ROTTENSTEINER a C. HEIPKE, „RELATIVE POSE ESTIMATION USING IMAGE FEATURE TRIPLETS,“ *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, XL-3/W2, 39-45. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W2-39-2015. ISSN 2194-9034. Dostupné také z: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-3-W2/39/2015/>.
- [18] D. SALOMON, The computer graphics manual. London, New York: Springer-Verlag, c2011. Texts in computer science.
- [19] F. Klawonn, Introduction to computer graphics: using Java 2D and 3D, London: Springer, c2008.
- [20] „Delaunay Triangulation,“ Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks, 2013 [cit. 2019-04-05]. [Online]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/delaunay-triangulation.html>.
- [21] F. H. RAZAFINDRAZAKA a K. POLTHIER, „Optimal base complexes for quadrilateral meshes,“ *Computer Aided Geometric Design*, 2017, 52-53, 63-74. DOI: 10.1016/j.cagd.2017.02.012. ISSN 01678396. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167839617300286>.
- [22] C. CONLAN, The blender Python API: precision 3D Modeling and add-on

development, California: Apress, 2017.

- [23] F. BILJECKI a K. A. OHORI, „Automatic semanticpreserving conversion between OBJ and CityGML,“ *Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation*, Netherlands: Delft, 2015.
- [24] „The PLY Format,“ Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks, 2012 [cit. 2019-04-05]. [Online]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/the-ply-format.html>.
- [25] „Hybrid Step Motors,“ Electromate, Canada [cit. 2019-04-05]. [Online]. Dostupné z: [https://www.electromate.com/assets/catalog-library/pdfs/applied-motion-products/AMP\\_HT17\\_Stepper\\_Motor\\_Specsheet.pdf](https://www.electromate.com/assets/catalog-library/pdfs/applied-motion-products/AMP_HT17_Stepper_Motor_Specsheet.pdf).
- [26] „Computer Vision Toolbox,“ Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks, 2012 [cit. 2019-04-05]. [Online]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/vision>.

# Seznam symbolů a zkratek

## Symboly:

$\pi$	...	Ludolfovo číslo
$\mathbb{R}$	...	Reálné číslo
$\mathbb{N}$	...	Přirozené číslo
$\in$	...	Je prvkem

## Zkratky:

Laser	...	Light amplification by stimulated emission of radiation
RANSAC	...	Random sample consensus
MLESAC	...	Maximum likelihood estimation sample consensus
RGB	...	Red, green, blue
DLT	...	Direct linear transformation
3D	...	Trojrozměrný
STL	...	Stereolithography
OBJ	...	Object file format
PLY	...	Polygon file format
CD	...	Compact disc

# Seznam příloh

Příloha 1 - Obsah přiloženého CD .....	63
--	----

## Příloha 1 - Obsah přiloženého CD

1. Vytvoření 3D modelu za pomoci laserového vzoru.pdf
  - Text práce v elektronické podobě
2. reconstruction.m
  - Skript sloužící k otestování metod prostorové rekonstrukce snímajících otáčející se objekt
3. uncalibratedStereoVision.m
  - Skript sloužící k otestování metody prostorové rekonstrukce při změně pozice kamer
4. calibratedStereoVision.m
  - Funkce k prostorové rekonstrukci metodou stereoskopie uplatněním rektifikace snímků
5. getIndex.m
  - Pomocná funkce pro hledání souřadnic bodů představujících nasvícený vzor laserem
6. meshGeneration.m
  - Funkce pro generování trojúhelníkové, případně čtyřúhelníkové plochy z bodů v prostoru získaných při rekonstrukci otáčejícího se objektu
7. calibration.m
  - Skript pro pořizování snímků sloužících ke kalibraci kamer a prostorové rekonstrukci
8. outdoor.m
  - Skript pro pořizování snímků při změně pozice kamer
9. stepper.py
  - Skript pro řízení krokového motoru pomocí Raspberry Pi
10. cam.py
  - Skript pro řízení krokového motoru a pořizování snímků z webkamer pomocí Raspberry Pi
11. Soubory s příponou .mat
  - Data pro otestování metod prostorové rekonstrukce obsahující zdrojové snímky a parametry kamer